

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE GEOMALLAS COMPUESTAS POR LLANTAS DE DESECHO

FEDERICO RESTREPO TORO

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director: José Ignacio Sierra Valencia



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2015**

Agradezco a todas las personas involucradas en este trabajo de grado para que este saliera adelante, especialmente a José Ignacio por acompañamiento incondicional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PRELIMINARES.....	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.3 OBJETIVO DEL PROYECTO	13
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.4 MARCO DE REFERENCIA	14
1.4.1 GEOMALLAS COMO SOLUCIÓN PARA SUELOS BLANDOS	15
1.4.2 CARGA A TRACCIÓN EN LAS GEOMALLAS.....	16
1.4.3 PROPIEDADES FÍSICAS.....	19
1.4.4 MATERIAL GRANULAR UTILIZADO	20
1.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS LLANTAS	20
1.5.1 HISTORIA DE LAS LLANTAS	20
1.5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS LLANTAS	21
1.5.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS AROS DE LLANTAS	23
1.6 CARACTERÍSTICAS DE LA MANILA PROPUESTA.....	26
2. METODOLOGÍA.....	28
2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN EN UNA SOLA HEBRA	28
2.1.1 MONTAJE PARA ENSAYO DE TRACCIÓN EN UNA SOLA HEBRA.....	29
2.2 MONTAJE PARA ENSAYO A TRACCIÓN DE DOBLE HEBRA	32
2.2.1 AMARRES.....	33

2.3	CARACTERIZACIÓN ASTM D6637	34
2.4	DEFINICIÓN DE ORGANIZACIÓN MATRICIAL	34
3.	DESARROLLO DEL PROYECTO	36
3.1	TRACCIÓN PARA SECCIÓN SIMPLE	36
3.2	TRACCIÓN PARA SECCION DOBLE	38
3.3	DETERMINACIÓN DE TEJIDO U ORGANIZACIÓN MATRICIAL.....	43
3.3.1	MODELACIÓN DIGITAL.....	45
3.3.2	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	46
3.3.3	RESULTADOS	48
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	50
4.1	ORGANIZACIÓN MATRICIAL	50
4.2	TRACCIÓN PARA SECCIÓN SIMPLE	50
4.3	TRACCIÓN PARA SECCIÓN DOBLE	51
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	53
5.1	CONCLUSIONES.....	53
5.2	CONSIDERACIONES FINALES	54
	BIBLIOGRAFIA.....	55
	ANEXO 1	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos disposición lineal de refuerzo, profundidad de 1 m.	25
Tabla 2. Ensayos con disposición espacial del refuerzo. Profundidad de 1 m.....	25
Tabla 3. Porcentajes de Elongación de la Soga a Cargas Ejercidas.....	27
Tabla 4. Rigidez y fuerza última para secciones sencillas.....	37
Tabla 5. Valores de fuerza equivalente por unidad de ancho.....	41
Tabla 6. Valores del módulo de secante para el punto ϵ_1 en ensayos de sección doble. .	41
Tabla 7. Resistencias a la tracción para 2%, 5% y resistencia última.	42
Tabla 8. Propiedades de entrada para los materiales de relleno en el modelo digital.	46
Tabla 9. Rigidez y módulo de elasticidad estimado para organizacioens cuadradas y triangulares.....	48
Tabla 10. Datos de referencia para geomallas comerciales.....	52

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 Bosquejo de deformación estimada de la geomalla para gravas.	17
Ilustración 2. Trabazón de partículas en las paredes de la geomalla.	20
Ilustración 3. Estructura de una llanta (Michelin, 2009).	22
Ilustración 4. Montículo rin.	23
Ilustración 5. Tipo de muestra caracterizada en la normativa ASTM D6637 para hebra simple.	28
Ilustración 6. Tipo de muestra planteada de forma análoga para ensayarse.	29
Ilustración 7. Pistón hidráulico y marco de apoyo utilizados.	30
Ilustración 8. Aparato propuesto para ensayar por tracción una sección básica de geomalla.	31
Ilustración 9. Detalle del pistón hidráulico utilizado.	31
Ilustración 10. Detalle del amarre realizado para ensayar la sección básica de la geomalla.	32
Ilustración 11. Muestra para ensayo de doble hebra.	33
Ilustración 12. Detalle de un amarre (Tobón G & Valencia E, 1986).	33
Ilustración 13. Muestra para ensayos de tracción con manilas organizadas.	34
Ilustración 14. Montaje de aro de llanta para ensayo de organización triangular.	35
Ilustración 15. Deformación de la llanta después del ensayo.	42
Ilustración 16. Desgaste sufrido por el talón después del ensayo.	43
Ilustración 17. Falla de la sogá después del ensayo.	43
Ilustración 18 Geometrías básicas de geomallas propuestas	44
Ilustración 19 Simplificación del modelo hexagonal, como modelo triangular.	45
Ilustración 20. Forma del terraplén modelado.	46
Ilustración 21. Resultado entregado por modelo digital.	48

Ilustración 22. Leyenda de desplazamiento para el resultado entregado.	49
Ilustración 23. Detalle de fuerza axial soportada por la geomalla de organización triangular.	49
Ilustración 24. Detalle de fuerza axial soportada por la geomalla de organización cuadrada.	49

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Datos de ensayo a para geomalla de organización triangular.	57
Anexo 2. Datos de ensayo a para geomalla de organización cuadrada.	58
Anexo 3. Ensayo 1 de tracción para sección simple.	59
Anexo 4. Ensayo 2 de tracción para sección simple.	60
Anexo 5. Ensayo 3 de tracción para sección simple.	61
Anexo 6. Ensayo 1 de tracción para sección doble.	62
Anexo 7. Ensayo 2 de tracción para sección doble.	63
Anexo 8. Ensayo 3 de tracción para sección doble.	64

RESUMEN

Entre los mayores contaminantes actuales se encuentran las llantas desechadas, su bajo grado de degradación y el alto crecimiento en el uso de estas genera la necesidad de encontrar maneras para reutilizar los neumáticos o partes de ellos. Una de las formas propuestas para esto es la generación de geomallas compuestas por aros de llantas desechadas, estos aros que están unidos entre sí por medio de sogas de polipropileno.

Las geomallas deben cumplir con los requerimientos pedidos comercialmente para ser utilizados en obras civiles. Es por eso que en este trabajo se pretenden encontrar las propiedades a tracción de la geomalla propuesta, adaptando ensayos a partir de la normativa ASTM D6637 que regula las pruebas a tracción más influyentes en el medio.

Se adaptaron los ensayos estandarizados para que coincidieran con las características físicas de la geomalla compuesta por aros de llanta de desecho; debido a que las geomallas comúnmente utilizadas tienen espacios abiertos mucho menores a los generados por la geomalla propuesta.

Se comparó la resistencia de las geomallas con dos organizaciones matriciales distintas, una con base en una organización matricial triangular y otra con base en una organización matricial cuadrada o rectangular. Se determinó que la mejor respuesta se encontró para organizaciones matriciales triangulares pues éstas tienen un mayor grado de rigidez.

Se hicieron ensayos de tracción para secciones simples que se definieron como la sección más básica de la geomalla, estos constaron de un aro de llanta sostenido por dos sogas de polipropileno de 8 mm de espesor. También se realizaron ensayos para secciones de un área más grande que constaron de un aro de llanta amarrado por tres sogas para simular una unión de la geomalla en área. Se realizaron tres ensayos para cada una de las secciones propuestas para así descubrir propiedades a tracción en los elementos más básicos de la geomalla. Se encontró que la falla es determinada por la resistencia a tracción de la soga de polipropileno.

Palabras clave: llantas de desecho, geomalla, soga de polipropileno, propiedades de tracción.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ABSTRACT

Among the biggest contemporary polluters are the wasted tires, its low degradation ratio and the growing in their use has created the necessity to find a way to reuse the tires or parts of them. One of the proposed methods is the creation of geogrids, based on tires bead united to each other by polypropylene ropes.

The geogrids must match the commercial requirements asked in the civil projects. Because of that, this work pretends to find the tensile properties in the proposed geogrid, adapting the test described in the ASTM D6637 regulation, that standardizes the most influent traction test for the geogrid medium.

The test was adapted to match the physical characteristics of the wasted tires bead geogrid; because the common geogrids have smaller open spaces than the proposed one.

This work compares the resistance of the proposed geogrids determined by different matricidal organizations, one with a triangular organization and the other in a square or rectangular organization. A better response was determined by the triangular organized geogrid, this because it's higher rigidity level.

Traction test were made for simple sections, defined as the most basic part of the geogrid, this sections be known as a tire bead hanged by 2 polypropylene ropes of 8 mm diameter. Also there were made test for area section, that be known as one tire bead hanged by 3 polypropylene ropes that emulates the union in the geogrid. There were made 3 test on each one of the proposed sections to find the tensile properties on the most basic elements in the geogrid. Was find that the failure were determined by the rope strength.

Key words: scrap tires, geogrid, polypropylene rope, tensile properties.

INTRODUCCIÓN

Como forma de reutilizar los desechos de llantas de vehículos, que componen un gran porcentaje de la contaminación generada por el hombre, este trabajo intenta encontrar las propiedades a tracción de los elementos básicos de la geomalla, así como comparar dos tipos de geomallas para encontrar cual funciona más eficientemente.

Las geomallas, que se encuentran entre los geotextiles, son una respuesta estructural a entre otros el mejoramiento estructural de suelos blandos. Haciendo uso de mecanismos como la rigidez del conjunto para disminuir la presión puntual y el confinamiento de partículas las geomallas pueden servir de apoyo para diques y carreteras reduciendo el área de lleno sobre suelos blandos.

Se quiso definir en qué tipo de organización matricial debe ser construida una geomalla para ser más eficiente entre dos propuestas, una de organización cuadrada y otra de organización triangular. Esto se logró ensayando diferentes formas de confinamiento de un aro de llanta para encontrar las propiedades tensionales de los diferentes mecanismos para así determinar la rigidez y el modulo de elasticidad propio de cada uno.

La estimación de los parámetros de tracción de la geomalla se mide mediante ensayos de tracción en secciones de geomalla que se consideran las más básicas. Estas secciones son los elementos que conforman la geomalla y son traccionados hasta la falla midiendo la fuerza generada a medida que se deforma la geomalla. Estos datos sirven para generar curvas fuerza deformación que a su vez sirven para caracterizar tensionalmente las secciones de la geomalla propuesta.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las mayores problemáticas ambientales es la generación de residuos. Entre la gran gama de residuos generados por el hombre uno de los más contaminantes y con menor índice de descomposición son los neumáticos de los automóviles. Mientras no existan alternativas de reciclaje para los neumáticos de desecho, se expone a la población a contaminación ambiental, producto de quema y vertederos ilegales (Ramírez C., 2011).

En Colombia el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial estimó que para el 2008 habría un consumo de 4.493.092 llantas que generarían 61.000 toneladas de este residuo al año (MAVDT, 2010). Después de su uso estas llantas obtienen en su mayoría un mal manejo para su desecho convirtiéndose en el hábitat ideal para toda suerte de plagas que transmiten enfermedades como el dengue, la fiebre amarilla y la encefalitis equina (MAVDT, 2010). En algunos casos las empresas utilizan las llantas de residuo como combustible para sus procesos industriales, así como otras personas queman las llantas para obtener el acero que estas poseen; todo esto generando problemas de contaminación atmosférica.

Además de problemáticas ambientales, este trabajo de grado quiere plantear la idea de generar una disminución del costo de las geomallas utilizadas sobre suelos blandos.

Los suelos blandos en general han sido un problema para la construcción. Esto debido a los grandes índices de deformación que presentan, trayendo así asentamientos parciales o totales para las obras civiles. Como respuesta para esto se pueden presentar varias soluciones como la remoción total del suelo o la transmisión de la carga a estratos más profundos mediante cimentaciones. Pero en los últimos años se han presentado soluciones más económicas como son la utilización de geotextiles.

Geotextil es el término general aplicado a los textiles permeables usados en la ingeniería geotécnica. Los materiales son hechos de una variedad de polímeros sintéticos en un proceso que involucra la combinación de fibras plásticas entrelazadas en una hoja continua (Fannin, 1986). Entre los geotextiles se encuentran los no tejidos donde las fibras se disponen de forma aleatoria y los tejidos donde las fibras se orientan en dos direcciones (trama y urdimbre) (Construmática, 2011). Entre los geotextiles tejidos se encuentran las geomallas que logran que un suelo previamente seleccionado trabaje de manera conjunta para brindar una superficie suficientemente resistente para soportar una estructura. Estas geomallas han sido probadas en los últimos años como una de las soluciones más efectivas en el control de deformaciones, pero su costo no siempre es bajo y en algunos lugares del territorio colombiano (que ciertamente son los que más trabajo necesitan) el presupuesto municipal o departamental no es suficiente para financiar todas las obras necesarias en un plan de desarrollo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En una sociedad que exige cada vez más características de sostenibilidad en los diferentes aspectos del desarrollo se ve necesaria la creación de metodologías que cumplan los requerimientos técnicos de las obras ingenieriles para las que son planteadas; pero que al mismo tiempo amortigüen el impacto ambiental que el desarrollo humano genera en el ecosistema. Mediante la reutilización de materiales no degradables se pueden aliviar impactos ambientales como son la polución por quema de basuras o la proliferación de enfermedades por el mal manejo de los desechos.

En el caso de las llantas existen impactos ambientales tanto por su quema como por la proliferación de insectos y roedores que encuentran en los botaderos de llantas un buen hábitat para su proliferación. En esta investigación se pretenden dar los primeros pasos en la generación de una geomalla compuesta por llantas de desecho que de otra manera podrían contribuir a los problemas anteriormente planteados.

Se plantea la idea de determinar la organización matricial de una geomalla hecha con los aros laterales de llantas de desecho con un aro interior de 14 pulgadas y unidas mediante manilas de polipropileno de 8mm. En base a esta organización hacer ensayos de tracción y fuerza cortante según la norma ASTM D6637 y ASTM D5321; con la finalidad de brindar una caracterización mecánica que sirva para dar los primeros pasos en la validación de la geomalla propuesta.

Es oportuno analizar los componentes básicos de la geomalla propuesta como precedente para investigaciones futuras que puedan dirigirse en el establecimiento de métodos que sirvan a los ingenieros y constructores como guía de trabajo en futuros proyectos. Que sirva como herramienta en toda suerte de obras geotécnicas para el control de deformaciones en suelos blandos; pero que a su vez sirva como fuente de reutilización de materiales no degradables como son las llantas de desecho.

1.3 OBJETIVO DEL PROYECTO

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la resistencia a la tracción de geomallas compuestas por aros de llantas de desecho unidos por manilas de polipropileno de 8mm considerando secciones simples y de múltiples nervios.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar un tipo de tejido u organización matricial en el cual se basará la geomalla, con base en los ensayos hechos para geometrías de mallas unidas por 4 y 6 manilas.
- Identificar y adaptar máquinas existentes para ensayos de resistencia a tracción, haciéndolas aptas para ensayar la geomalla propuesta.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Encontrar las propiedades de tracción bajo ensayos de tracción simple en muestras de geomalla compuesta por aros llantas de desecho unidos con manila de polipropileno de 8 mm bajo el ensayo de resistencia a tracción simple, adaptándolo del propuesto por la norma ASTM D6637.
- Encontrar las propiedades de tracción bajo ensayos de tracción en múltiples nervios en muestras de geomalla compuesta por aros de llantas de desecho unidos con manila de polipropileno de 8 mm bajo el ensayo de fuerza de tracción para múltiples nervios, adaptándolo del propuesto por la norma ASTM D6637.
- Recopilación de resultados, conclusiones sobre el comportamiento de la geomalla propuesta.

1.4 MARCO DE REFERENCIA

Los geotextiles y las geomallas en muchos casos compiten como aplicación de refuerzo para estructuras, su diseño es similar pero se diferencian en la manufactura, apariencia, propiedades y colocación. Una geomalla puede ser definida como:

“Geomalla: material geosintético que consiste un conjunto de nervios paralelos intercalados, con aperturas del tamaño suficiente para permitir el anclaje del suelo, rocas u otro material geotécnico que lo rodea.”
(Koernel, 2005)

Las geomallas son materiales de forma matricial con espacios abiertos llamados aberturas que normalmente tienen anchos de 10 y 100 mm que son llamados nervios longitudinales y transversales respectivamente.

Una geomalla combina simultáneamente distintos efectos: la reducción de presión, confinamiento de partículas y la filtración de partículas.

La **Reducción de presión** hace referencia al efecto que logra la rigidez de la geomalla, esta rigidez logra disipar la presión puntual entre un área mayor para así repartir más efectivamente la fuerza que se le aplique sobre un área más grande. Menos presión significa menos volumen de agua para desalojar partículas finas.

El **confinamiento de partículas** es el efecto conjunto de un espacio predeterminado de las aberturas de la geomalla con una granulometría específica. Este confinamiento permite garantizar que las aberturas intersticiales entre los granos del suelo sean fijos y sean de un tamaño predecible, un requisito básico de la filtración.

La **filtración** es lograda gracias a la confinación pues esta no permite el paso de granos de suelo fino al volumen trabajado sobre la geomalla. La filtración es la que hace posible que los suelos blandos no se junten con los suelos áridos que conforman el relleno de la estructura. Se disponen de guías de diseño para graduar los rellenos y tamaño de abertura para diferentes tipos de suelo a trabajar.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.4.1 GEOMALLAS COMO SOLUCIÓN PARA SUELOS BLANDOS

En algunos casos se ha indicado que el uso de geotextiles como refuerzo sirve para incrementar la capacidad de carga última de cimentaciones superficiales. Sin embargo, cuando el ancho de la cimentación superficial es mayor que aproximadamente 1 m, el diseño es principalmente gobernado por el asentamiento y no por la capacidad de carga última, es decir, la flexibilidad de los geotextiles no mejora la capacidad de carga-soporte bajo niveles limitados de asentamiento. Por tal razón se podría usar capas de geomallas como refuerzo en arenas para soportar cimentaciones superficiales (Chacón J, 2012).

Las geomallas han sido utilizadas como solución para incrementar la capacidad de carga de suelos blandos en diferentes formas: como una capa continua y como varias capas continuas espaciadas con suelo seleccionado entre las capas (Koernel, 2005).

Para la forma de capa continua se tienen los resultados de ensayos de laboratorio a gran escala que dieron como resultados gráficas donde se representan las deformaciones obtenidas mediante diferentes cargas aplicadas. Estas gráficas son utilizadas para comparar un modelo con y sin la aplicación de la geomalla, teniendo en cuenta factores como el coeficiente de uniformidad del suelo y la profundidad de la capa de suelo efectiva. Las gráficas no brindan una información que tenga en cuenta factores puntuales bajo los que puedan ser afectadas las obras civiles, pero además de esto no hay formas de diseño precisas disponibles.

En el método de distintas capas de geomallas separadas con suelo se trata de eliminar o minimizar los asentamientos diferenciales en vez de concentrarse en una capacidad de carga general (Koernel, 2005). Karl Terzagui en Austria y Aston Marston en los Estados Unidos crearon la teoría analítica donde se simplifica la fórmula para calcular el esfuerzo vertical que sufre una partícula bajo tierra.

$$\sigma_z = 2\gamma_{ave} * R \left[1 - e^{-\frac{0.5H}{R}} \right] + q e^{-0.5 \frac{H}{R}} \quad (1)$$

Donde:

σ_z = Esfuerzo vertical sobre la estructura

γ_{ave} = Peso específico promedio del material sobre el área deformable

R = Radio de la zona de deformación diferencial

H = Altura total sobre el área asentable

q = Presión aplicada sobre la superficie.

Para valores altos de H ($H > 6R$) la fórmula se reduce al siguiente valor constante de esfuerzo vertical:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$\sigma_z = 2\gamma_{ave} * R \quad (2)$$

Teniendo un método para calcular el esfuerzo vertical, se puede calcular entonces el esfuerzo en una capa de relleno colocada sobre una preexistente. Teniendo en cuenta que esta puede ser tanto una geomalla como un geotextil. Y así podemos calcular la resistencia necesaria de la geomalla para el caso como:

$$T_{reqd} = \sigma_z R \Omega \quad (3)$$

Siendo:

$$\Omega = 0.25 \left[\frac{2y}{B} + \frac{B}{2y} \right] \quad (4)$$

Donde:

T_{reqd} : fuerza de diseño a tracción necesaria por la geomalla para un caso particular.

B = Grosor del espacio trabajado.

y = Profundidad del espacio trabajado.

1.4.2 CARGA A TRACCIÓN EN LAS GEOMALLAS

Cabe aclarar que en un diseño real, la fuerza de tracción soportada por una geomalla deformada bajo carga no se sabe, y debe ser estimada.

Como estimación de carga en el modelo se ha escogido la carga planteada por el doctor Qiming Chen en su tesis (Chen, 2007), se midió la deformación de la geomalla con deformímetros; la fuerza de tracción soportada por la geomalla puede ser evaluada por la deformación que sufre esta al ejercerse una carga. En su tesis de doctorado el señor Chen halló que el esfuerzo desarrollado a lo largo de la geomalla es directamente proporcional a la deformación que esta soporta.

El autor asume que la deformación de la geomalla bajo una carga monotónica se caracteriza por moverse hacia abajo uniformemente, y que los segmentos fuera de la carga tienen una deformación despreciable. Es así como el autor muestra una deformación que se puede ver en la Ilustración 18.

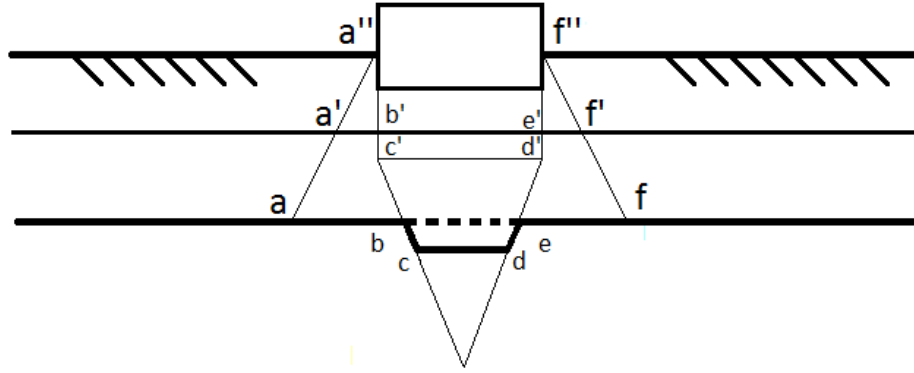


Ilustración 1 Bosquejo de deformación estimada de la geomalla para gravas.

Basado en las deformaciones obtenidas, el autor determinó que las líneas de frontera a'-a y d'-d mostradas en la figura tienen una pendiente de 2:1 (vertical: horizontal).

Basado en modelos de arena y estudios de elementos finitos, Schmertmann y Harman en 1978 sugirieron una distribución práctica del esfuerzo de tracción bajo un punto de presión en términos de un factor de influencia I_{ez} . El valor máximo de este factor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$I_{ez} = 0.5 + 0.1 \sqrt{\frac{q + \gamma D_f}{\sigma'_{vp}}} \quad (5)$$

Donde:

$$\sigma'_{vp} = \gamma \left(D_f + \frac{B}{2} \right) \quad (6)$$

Ó

$$\sigma'_{vp} = \gamma(D_f + B) \quad (7)$$

Siendo la primera para zapatas cuadradas y la segunda para zapatas continuas. Donde q es la presión ejercida por la zapata, γ es el peso específico del suelo, D_f es la profundidad medida y B es el ancho de la zapata.

Utilizando esto, se puede calcular el asentamiento elástico S_e en arenas y gravas de la siguiente forma:

$$S_e = C_1 C_2 C_3 (q - \gamma D_f) \sum \frac{I_s \Delta z}{E_s} \quad (8)$$

$$C_1 = 1 - 0.5 \frac{\gamma D_f}{q - \gamma D_f} \quad (9)$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \log\left(\frac{t}{0.1}\right) \quad (10)$$

$$C_3 = 1.03 - 0.03L/B \geq 0.73 \quad (11)$$

Donde C_1 es un factor de corrección para la profundidad asentada, C_2 es un factor de corrección para la fluencia secundaria y C_3 es un factor de corrección para la forma del elemento que ejerce la presión. “ E_s ” es el módulo de elasticidad de la arena; t es el tiempo desde la aplicación de la carga en años ($t > 0.1$ años), L es la longitud de la fundación y B su ancho.

El esfuerzo a tracción promedio a lo largo del asentamiento provocado por una carga puede ser calculado como:

$$\varepsilon_{avg} = \frac{L_{ab} + L_{bc} + L_{cd} + L_{de} + L_{ef} - L_{af}}{L_{af}} \quad (12)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$L_{ab} = L_{ef} = z/s$$

$$L_{bc} = L_{de} = S_e / \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$L_{cd} = B - 2S_e \cot g\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$$

La fuerza de tracción se puede encontrar como:

$$T_{avg} = J \varepsilon_{avg} \quad (13)$$

Donde J es el módulo de elasticidad de la geomalla.

El módulo de elasticidad de la geomalla propuesta depende de diversos factores, en gran parte se debe a que la geomalla no está compuesta de un solo material; la manila se comporta de forma diferente a los aros de las llantas, estos aros a su vez están compuestos por caucho vulcanizado y un entramado de cables de distintos metales que tienen distintos módulos de elasticidad. Teniendo en cuenta que incluso las llantas al ser de desecho no serían del mismo productor, entre ellas también se tiene un distinto módulo de elasticidad.

Es por lo anterior presentado, que el módulo de elasticidad de la geomalla utilizada en la estimación de carga para este trabajo de grado no puede representar fielmente la realidad, sino que es una estimación basada en los materiales, con la simple finalidad de determinar la organización matricial indicada en la geomalla propuesta.

1.4.3 PROPIEDADES FÍSICAS

Muchas de las propiedades físicas de las geomallas, pueden medirse directamente y son relativamente simples, otras propiedades de interés como la masa por unidad de área puede variar desde 200 a 1000 g/m², y el porcentaje de área abierta puede variar de 40 a 95%. Esto último teniendo en cuenta el principio de que haya un espacio lo suficientemente grande para que el suelo se conecte entre las capas.

Densidad: La densidad propia de la geomalla depende directamente del polímero con el que está compuesta. Mallas homogéneas pueden ser hechas con Polietileno de alta densidad (HDPE) o de Polipropileno y pueden ser medidas según las características de estos.

Resistencia a la flexión: Esta propiedad es de gran interés para lo que concierne a la capacidad de construcción. Puede ser medida utilizando el ensayo de rigidez a flexión ASTM D1388 (Koernel, 2005).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Rigidez a la torsión: Aunque no se ha formalizado un ensayo para geomallas, se ha propuesto fijar un cuadrado bidireccional de geomalla en un marco rígido y agarrar fijamente su nodo central. Se aplica un torque y se mide la resistencia angular, el hoja de resultados muestra un desempeño lineal para geomallas rígidas. Para geomallas flexibles, la respuesta es inicialmente baja pero incrementa rápidamente después de 5° o 10° de rotación.

1.4.4 MATERIAL GRANULAR UTILIZADO

Una de las principales ventajas de las geomallas es la confinación que estas generan al material granular que se utiliza. Las paredes de la geomalla generan un mecanismo de trabazón en donde las partículas más grandes de la granulometría escogida se quedan retenidas, estas partículas más grandes tienen unos espacios intersticiales que son llenados por partículas de un grano más pequeño. Este proceso de llenar los espacios intersticiales con partículas cada vez más pequeñas genera que las capas de la geomalla no dejen pasar el material blando al interior del terraplén construido.

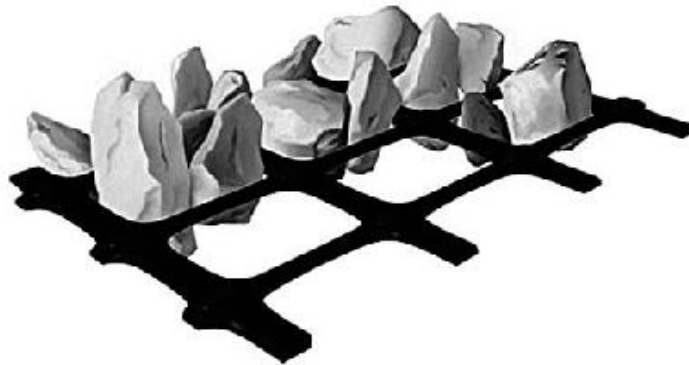


Ilustración 2. Trabazón de partículas en las paredes de la geomalla.

Esta trabazón depende de un confinamiento lateral dado por las paredes de la geomalla, lo que hace que la resistencia a tracción de esta sea una característica esencial entre las propiedades mecánicas de la geomalla.

1.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS LLANTAS

1.5.1 HISTORIA DE LAS LLANTAS

En 1839 Charles Goodyear, accidentalmente volcó un recipiente de azufre y caucho encima de una estufa, inventando así la vulcanización, esto generó que las moléculas elásticas del caucho quedaran unidas entre sí en una mayor o menor ex tracción; haciendo el caucho más estable, rígido y durable. Este material fue utilizado en 1888 por Jhon Dunlop para crear la primera llanta neumática, rellenando el caucho vulcanizado con aire. Goodrich, una compañía de los estados unidos, empleó el uso de lona y negro de

humo para darle una mayor durabilidad a las llantas en 1896. Después en 1911 Phillip Strauss aisló el aire en una cavidad interior y remplazó la lona por fibras de algodón a lo largo de la capa de rodadura para disminuir su desgaste. Estos cordones de algodón fueron remplazados después por materiales sintéticos como el nylon o cordón de poliéster, incrementando la durabilidad y reduciendo el peso de la llanta. Más tarde se empezó a agregar acero a la banda de rodadura dando paso a las llantas radiales, que constituyen actualmente la mayor sección del mercado de llantas.

1.5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS LLANTAS

Las llantas se denominan a la pieza toroidal que funciona como rueda para la mayoría de los vehículos modernos. Están compuestas por un sólido elásticamente deformable el cual es montado en un rin para transmitir la energía producida por el motor. Estas son las encargadas de soportar la gran mayoría de las fuerzas que afectan al vehículo, transmiten la rotación y absorben vibraciones. Este hecho influye no solo en la dinámica sino también en otros aspectos como el daño producido en su estructura, en el “confort” de los pasajeros y/o el maltrato en la carga (Rodrigo & Orozco, 2004).

Su composición puede variar entre numerosos compuestos de materiales que comúnmente se pueden encontrar en las proporciones listadas a continuación:

- Caucho/elastómeros: 47%. Este material puede ser natural, sintético o una mezcla de ambos. Siendo el natural proveniente del árbol de la Hevea, y el sintético proveniente a partir del petróleo.
- Negro de humo: 21.5%. El negro de humo es un producto residual de la combustión de hidrocarburos líquidos, que se utiliza como agente de relleno y refuerzo del caucho (Rodrigo & Orozco, 2004).
- Metal: 16.5%. En las llantas radiales, el metal o comúnmente acero brinda un rigidez y permite un desempeño mejor.
- Productos químicos: 8%. Distintos productores de llantas usan compuestos químicos como aditivos, estabilizadores y endurecedores.

La estructura básica de la llanta se compone de diferentes partes:

- Cavidad interior: Es la capa que aísla el aire.
- Lona de Carcasa: Esta lona determina la dureza de la llanta y soporta la presión transmitida por la cavidad interior. Cada lona de una llanta (automóvil) tiene unos 1400 cables, cada uno de ellos puede resistir una fuerza de 15 kg (Blumekranz, Mora, & Toro, 2005).
- Talón: Este actúa como refuerzo para transmitir la fuerza de frenado hacia la zona de contacto con el suelo.
- Aro: Objeto que puede soportar hasta 1800 kg en automóviles, utilizado para permitir que el neumático se ajuste a la llanta.
- Costado: El costado de la llanta protege a la carcasa a contra golpes, roces, cortes, etc....
- Cinturones: Cables textiles o metálico estructura se complementa con cinturones formados por tejidos de cuerdas con un alto módulo de elasticidad, que corre circunferencialmente en el neumático, entre la carcasa y la banda de rodamiento.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Estos cinturones proporcionan la estabilidad direccional, mientras que el arreglo de fibras radiales proporciona suavidad en la marcha (Rodrigo & Orozco, 2004).

- Banda de rodamiento: La parte de la llanta que asegura el contacto con el suelo y tiene el grabado que ayuda al agarre de la llanta en todo tipo de superficies.
- Talón: estructura se complementa con cinturones formados por tejidos de cuerdas con un alto módulo de elasticidad, que corren circunferencialmente en el neumático, entre la carcasa y la banda de rodamiento. Estos cinturones proporcionan la estabilidad direccional, mientras que el arreglo de fibras radiales proporciona suavidad en la marcha.

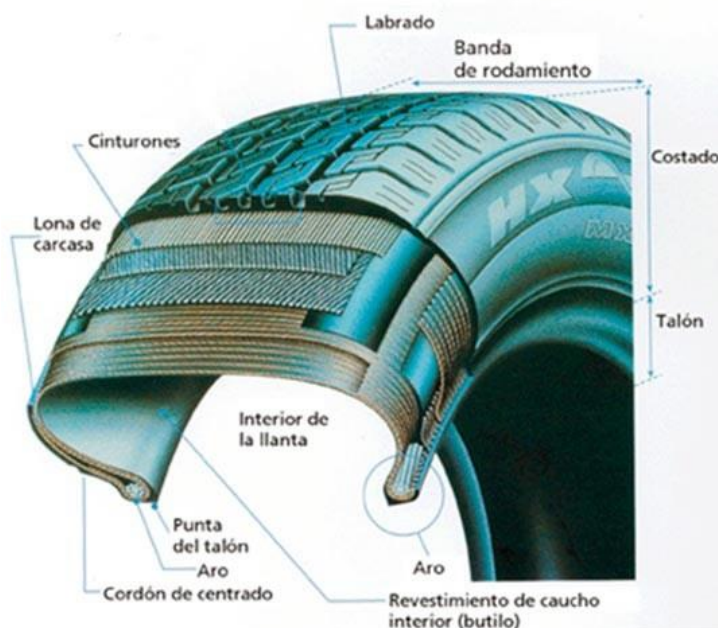


Ilustración 3. Estructura de una llanta (Michelin, 2009).

Las llantas desechadas, presentan todavía características mecánicas que las hacen aptas para usos como material de refuerzo. Las llantas por la importancia que tienen en la importancia de las personas y elementos que son transportados con su ayuda, son sometidas a estrictos controles de calidad por los fabricantes, que realizan los ensayos de laboratorio y campo para asegurar que el producto ofrezca seguridad.

Para el uso particular de las llantas como material de refuerzo, es posible asumir que cumplen en buena forma, aún después de usadas, las condiciones básicas de servicio.

1.5.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS AROS DE LLANTAS

El aro de la llanta es una estructura compuesta por alambres de acero de alta resistencia a la tracción, estos forman un aro y son incorporados durante la construcción de la llanta. Como función principal tiene darle resistencia al talón y mantener la llanta ensamblada con el rin de la rueda. El aro es uno de los componentes más fuertes en la estructura, pues una falla en él se traduce en una falla total de la llanta.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX se corría el riesgo de que la llanta se desencajara del rin cuando se le sometía a presiones laterales al dar curvas en movimiento. A principios del siglo XX se estableció el uso de los aros como protección lateral de las llantas. El avance tecnológico de los rines y de los aros redujo cada vez más este riesgo, es así como se creó un montículo en los rines donde se genera una especie de anclaje mecánico de los aros de las llantas. Pero estos a su vez traen un problema: al ejercerse una gran fuerza lateral a la llanta el talón puede sobrepasar la protección mecánica que trae el montículo y deslizarse a lo largo del rin como se muestra en la Ilustración 4.

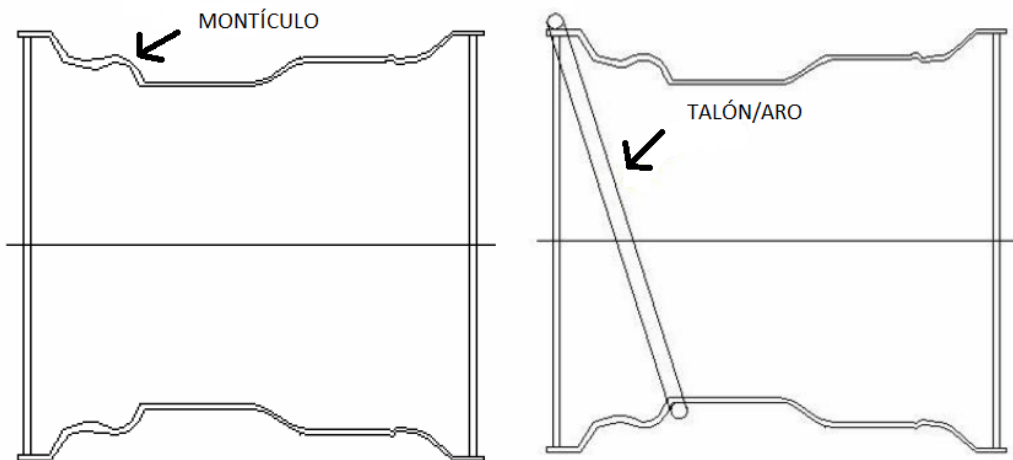


Ilustración 4. Montículo rin.

Al ser una estructura que combina toda clase de subestructuras, las modificaciones de cualquier parte de la rueda conlleva la modificación de otra parte de esta. Estas modificaciones han sido permanentes a lo largo del tiempo y seguirán cambiando en años venideros.

En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de aros, cada fabricante difiere la cantidad de alambres utilizados, el grosor y la distribución de estos. Entre los más comunes están (Doradla, 2005):

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Aros con cables simples: estos son los más comunes y consisten en un cable enrollado múltiples para generar un segmento grueso que pueda distribuir la fuerza.
- Aro con cable simple: se trenzan varios cables alrededor de un único núcleo.
- Aro con cables trenzados: se trenzan de 13 a 21 cables de acero en una organización plana y son cubiertos con caucho, generando una tira plana que da varias vueltas alrededor del talón de la llanta.
- Aro sin tramado: se diferencia del anterior pues los cables no son trenzados sino puestos paralelamente y se cubren de caucho.

La resistencia de los aros depende de distintos factores, el grosor de los cables, la cantidad y la organización de este. La “American Society of Testing Materials” o ASTM en su artículo D4975- 14 deja al criterio de cada productor el nivel de seguridad o fortaleza de los cables para aros.

El punto de falla para los cables puede variar entre 1540 N y 5540 N. La cantidad de cables puede ir entre 10 y 30 cables, esto significa que un aro de llanta puede soportar hasta 150 kN de fuerza aplicada en los casos más extremos. Pero un valor normal se encuentra en los 5400 N (Harris & Evans, 2013).

En el trabajo de grado presentado por Jorge Alberto Tobón G. y Héctor Hernando Valencia E. se muestra la recopilación de un estudio donde se presenta la resistencia a tracción de las tapas laterales de las llantas. Estos encontraron los siguientes resultados: la resistencia a la tracción que ofrece una llanta se debe a su estructura compuesta por fibras naturales o artificiales (como el nylon o el rayón principalmente) y por el acero. Las propiedades del acero son bien conocidas; en cuanto al nylon y el rayón, que son resinas sintéticas del grupo de las poliamidas, exigen para confeccionar la fibra el molde en monofilamentos flexibles de gran resistencia, tenacidad y durabilidad (Tobon G & Valencia E, 1986).

Encontraron que la resistencia a la tracción para tapas laterales es de 2.6 toneladas fuerza con una desviación normal de 1 tonelada fuerza. Los valores de la desviación normal se deben al diferente grado de desgaste de las llantas y ensayadas y obviamente a las diferencias de fabricación.

También realizaron ensayos de adherencia suelo-llanta, éstos se realizaron sobre llantas embebidas en un terraplén aluvial, enterradas de uno a dos metros, tiradas por cables de acero unidos a camiones localizados cinco metros frente al terraplén, con velocidad de 0.75 mm/s en promedio. Encontraron los siguientes resultados:

Tabla 1. Ensayos disposición lineal de refuerzo, profundidad de 1 m.


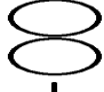

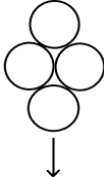
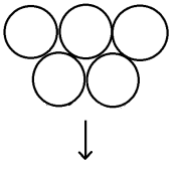
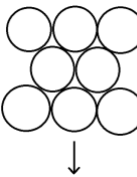
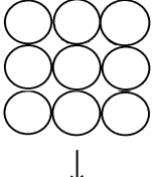
Disposición			
Fuerza máxima [kN]	195	300	>335
Desplazamiento frontal del elemento [cm]	7	40	>29
Fuerza necesaria para 10 cm de deformación [kN]	190	200	250

Tabla 2. Ensayos con disposición espacial del refuerzo. Profundidad de 1 m.

Disposición				
Fuerza máxima [kN]	>430	>540	>575	>330
Desplazamiento frontal del elemento [cm]	>36	>46	>38,5	>25,5
Fuerza necesaria para 10 cm de deformación [kN]	100	250	225	200

Se encontró que se tienen módulos de elasticidad altos, la deformación de falla se incrementa con el número de elementos y se alcanzó solo después de un deslizamiento

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

del frente del elemento ensayado. Se encontró que las llantas presentan buen comportamiento mecánico para ser utilizadas en estructuras de tierra reforzada (Tobon G & Valencia E, 1986).

1.6 CARACTERÍSTICAS DE LA MANILA PROPUESTA

En este trabajo de grado, como unión entre los aros de llantas, se propone utilizar la sogá PP 8mm, rafia 5/16 que produce la empresa Compañía de Empaques en la ciudad de Medellín. Esta compañía suministró información necesaria para caracterizarla:

Esta sogá es hecha de polipropileno, utiliza tres cabos y tiene una densidad líneal de 29,5 m/kg con una variación de máximo 10%. Manteniendo sus propiedades mecánicas en un rango de temperatura entre los 0 y 100 grados centígrados

Esta sogá no posee protección a los rayos ultravioleta, sin embargo la geomalla como reforzamiento del suelo estará cubierta de los rayos del sol, lo que hace innecesaria la utilización de una sogá con aditivos para la protección a la luz U. V.

La sogá presenta protección a químicos como: ácidos fuertes (sulfúrico, Clorhídrico, Nítrico, Fórmico, Fluorhídrico). A bases (Soda cáustica, Hidróxido de potasio, Carbonato de Sodio, Hidróxido de amonio). Además detergentes, alcoholes, sales, aceites, peróxido de hidrógeno.

Tabla 3. Porcentajes de Elongación de la Soga a Cargas Ejercidas.

	Calibre	Peso	Resistencia	Elongación
	(mm)	(Titulo TEX)	(kgf)	(%)
	8 mm	33900 +/- 5%	Mín. 770	Máx. 18
	8.8	32880	1080	16.8
	8.6	31175	1060	15.9
	8.6	30121	870	17.2
	8.6	32478	1120	14.4
	8.7	33538	1080	14.2
	8.8	31903	1030	18.4
	8.7	32540	1070	18.1
	8.8	33395	1120	18.2
	8.7	32294	1080	18.6
	8.6	34655	1180	20
	8.5	34652	1170	17.4
	8.7	33239	1100	16.7
	8.8	33541	1210	19.8
	8.5	34621	1130	18.7
	8.7	38171	1180	15.6
	8.6	32028	1150	19.1
	8.6	34229	1130	16
	8.2	34165	1020	17.1
	8.5	32600	1120	17.6
Promedio	8.6	33275	1100	17
Máximo	8.8	38171	1210	20
Mínimo	8.2	30121	870	14

La Tabla 3 muestra la respuesta de la soga propuesta cuando se ejercen diferentes tipos de cargas, se puede observar que tiene una resistencia mínima a la tracción de 870 kgf, aunque la empresa que la produce garantiza una resistencia mínima de 770 kgf con una elongación de rotura de 18%.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2. METODOLOGÍA

2.1 ENSAYO DE TRACCIÓN EN UNA SOLA HEBRA

La normativa ASTM D6637 “Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method” caracteriza para la mayoría de las geomallas comerciales la metodología utilizada para determinar sus propiedades a tracción. Estas propiedades son las propuestas a encontrar en este trabajo de grado. Este método es utilizado como base para controles de calidad y aceptación comercial de la geomalla.

En la normativa previamente mencionada se requiere que una sola hebra representativa de la geomalla se agarre y sujete a una fuerza a tracción utilizando una máquina de extensión constante. Según esta normativa, todas las geomallas pueden ser ensayadas por estos métodos. Algunas modificaciones pueden ser necesarias para geomallas específicas debido a características de forma. Este es el caso de la geomalla planteada en el trabajo de grado, donde por el tamaño y la forma de la estructura no es posible hacerse de la manera tradicional.

Esta normativa pide que para ensayos de tracción de una sola hebra, se utilice una muestra como se ilustra en la Ilustración 5, haciendo referencia a la geomalla planteada, se ha determinado que una hebra de geomalla está compuesta por el sistema estructural más simple, este es un aro de llanta que une dos manilas de polipropileno tipo rafia de 8 mm como se muestra en la Ilustración 6.



Ilustración 5. Tipo de muestra caracterizada en la normativa ASTM D6637 para hebra simple.

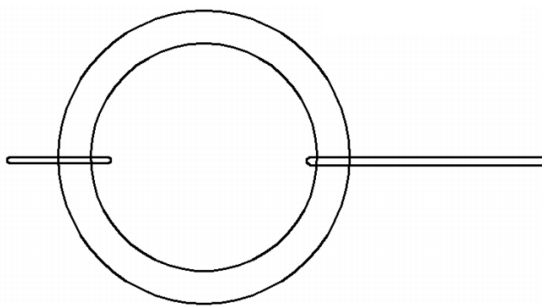


Ilustración 6. Tipo de muestra planteada de forma análoga para ensayarse.

Como resultado, la normativa ASTM D6637 pide una fuerza promedio última soportada por la geomallas; así como la deformación obtenida con esta fuerza. Se debe examinar la curva fuerza deformación obtenida con los datos suministrados en el ensayo, para así determinar una deformación elástica estimada.

Los aros de llanta utilizados en el montaje de ensayo fueron iguales, de referencia DOT Y09 L YA3G para la marca Hankook.

La velocidad para este ensayo es siempre constante y es de 5 mm/s.

2.1.1 MONTAJE PARA ENSAYO DE TRACCIÓN EN UNA SOLA HEBRA

Se utiliza un pistón hidráulico con una capacidad de carga de 50 toneladas fuerza, apoyado en un marco horizontal, ambos son mostrados en la Ilustración 7.



Ilustración 7. Pistón hidráulico y marco de apoyo utilizados.

El pistón hidráulico se comprimirá ejerciendo una fuerza de tracción a un segmento de la geomalla que se ha definido como la sección básica que la compone. La sección básica está compuesta por una llanta y una manila de ocho milímetros. Esta sección será sometida a una carga de tracción por parte del aparato mostrado en las Ilustración 8, Ilustración 9 e Ilustración 10.

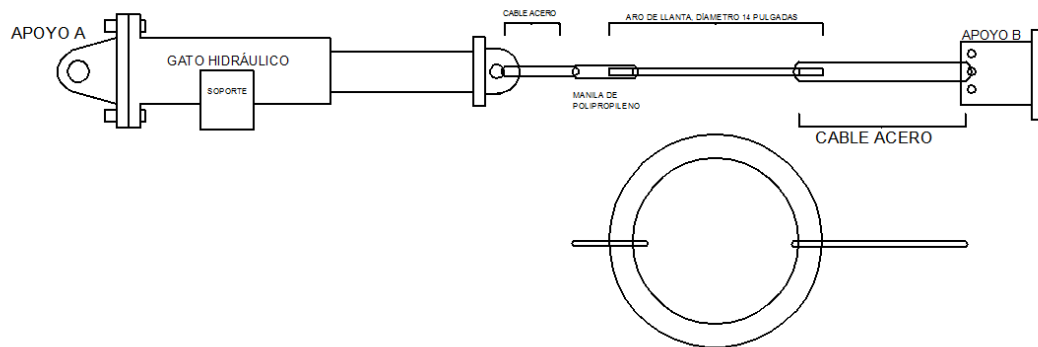


Ilustración 8. Aparato propuesto para ensayar por tracción una sección básica de geomalla.

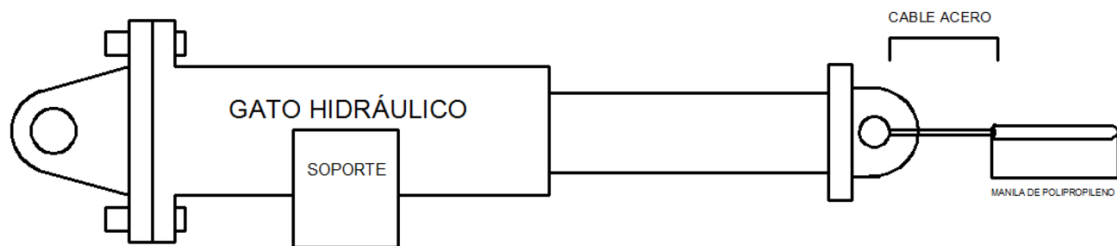


Ilustración 9. Detalle del pistón hidráulico utilizado.

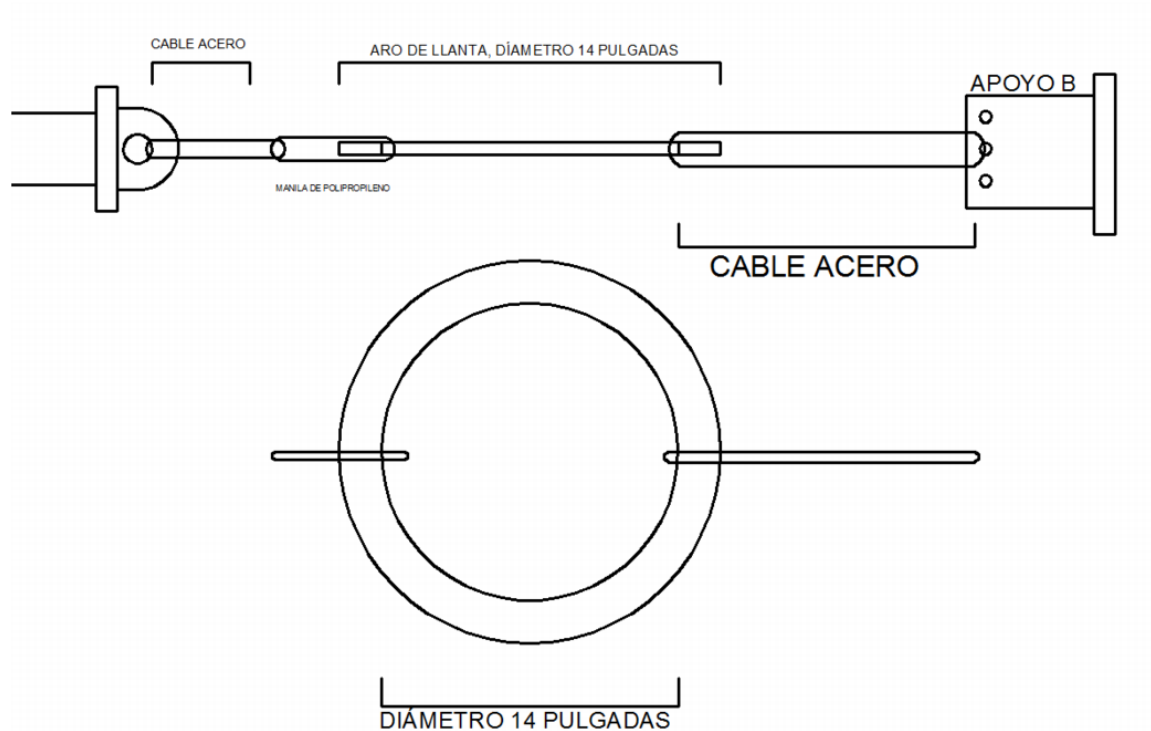


Ilustración 10. Detalle del amarre realizado para ensayar la sección básica de la geomalla.

Se utilizan cables de acero para amarrar la manila de una longitud definida y los puntos de amarre en el marco.

El pistón hidráulico se contrae constantemente generando una fuerza de tracción al objeto a ensayar, este mismo pistón tiene sensores que pueden medir tanto la fuerza ejercida como la deformación del elemento. Los datos serán recolectados para ser analizados posteriormente.

2.2 MONTAJE PARA ENSAYO A TRACCIÓN DE DOBLE HEBRA

En el ensayo a tracción para doble hebra, se utiliza el mismo montaje que para el ensayo a tracción de una sola hebra, con la diferencia de que se utiliza la compresión del pistón para tensionar una llanta unida a tres sogas de polipropileno. Estas están distribuidas en un ángulo de 120° de separación entre sí mismas. Como se muestra en la Ilustración 11. Las manilas de polipropileno están amarradas a su otro extremo de tubos metálicos que a su vez están apoyados en la placa, esto con el fin de confinar la llanta para que al ser tensionada solo influyan los elementos deseados.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

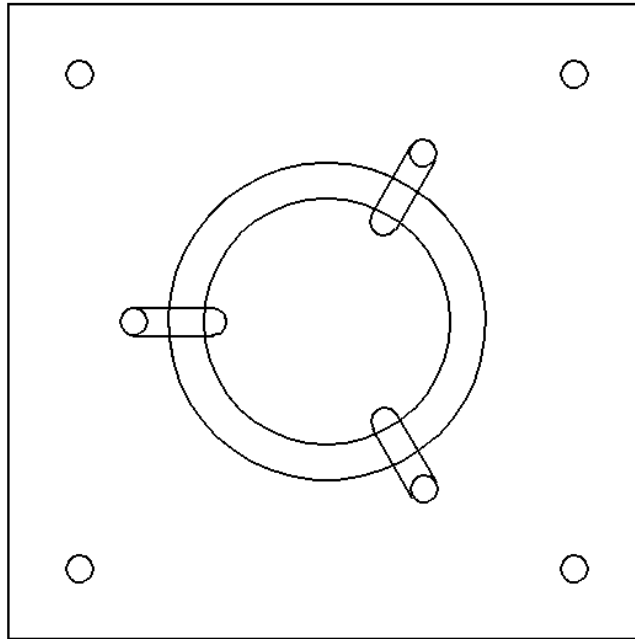


Ilustración 11. Muestra para ensayo de doble hebra.

La velocidad para este ensayo es siempre constante y es de 5 mm/s.

2.2.1 AMARRES

Las sogas que sostienen el aro de llanta, están amarradas a sí mismas alrededor de los aros mediante un nudo no corredizo mostrado en la Ilustración 12.

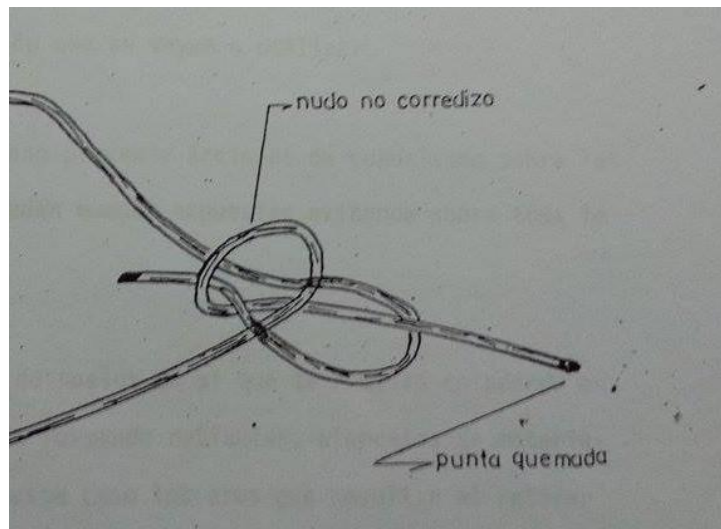


Ilustración 12. Detalle de un amarre (Tobón G & Valencia E, 1986).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se debe cuidar que un efecto cortante de los elementos exteriores del ensayo desgaste las sogas antes de estas ser sometidas a las cargas esperadas en el ensayo.

2.3 CARACTERIZACIÓN ASTM D6637

ASTM o “American Society for Testing and Materials” en su documento ASTM D6637 ha estandarizado las pruebas de tracción para geomallas, en estas se requiere que las geomallas comerciales entreguen entre otras características la carga máxima que resiste el elemento a tracción antes de su falla y la elongación porcentual que esta desarrolla en el punto de falla. Para el ensayo de sección doble la normativa pide que se entregue la fuerza última a tracción soportada por la geomalla, la fuerza equivalente por unidad de ancho y la elongación en porcentaje.

2.4 DEFINICIÓN DE ORGANIZACIÓN MATRICIAL

Para definir la organización matricial se trata de establecer propiedades mecánicas aparentes en los dos tipos de tejidos propuestos como pueden verse en la Ilustración 18. Para esto se plantea hacerse un ensayo de tracción a un aro de llanta con una distribución de manilas como sería en la realidad.

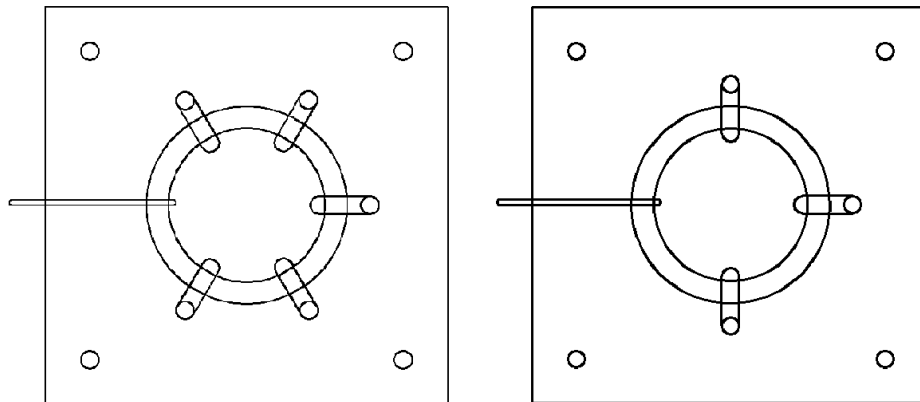


Ilustración 13. Muestra para ensayos de tracción con manilas organizadas.



Ilustración 14. Montaje de aro de llanta para ensayo de organización triangular.

Esta distribución se logra utilizando una placa de acero que mediante tornillos sirve de apoyo para organizar las manilas alrededor del aro de llanta. Los tornillos son recubiertos para proteger las manilas al ser ensayadas. Estas manilas tienen 20 centímetros de longitud, simulando la longitud que tendrían en la geomalla completa.

Se le aplica a una velocidad constante una carga a tracción a las probetas para así encontrar una gráfica Fuerza- Deformación que sirva para caracterizar el material y así utilizar estos datos en el programa Phase² que analiza mediante elementos finitos obras civiles; en este programa caracterizan los dos tipos de geomallas con las propiedades anteriormente encontradas. Se diseñan dos estructuras con las mismas características pero diferenciando el tipo de geomalla que las refuerza.

La estructura que mejor responda a las cargas suministradas será la cual decida qué tipo de organización matricial se tendrá para la geomalla.

3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 TRACCIÓN PARA SECCIÓN SIMPLE

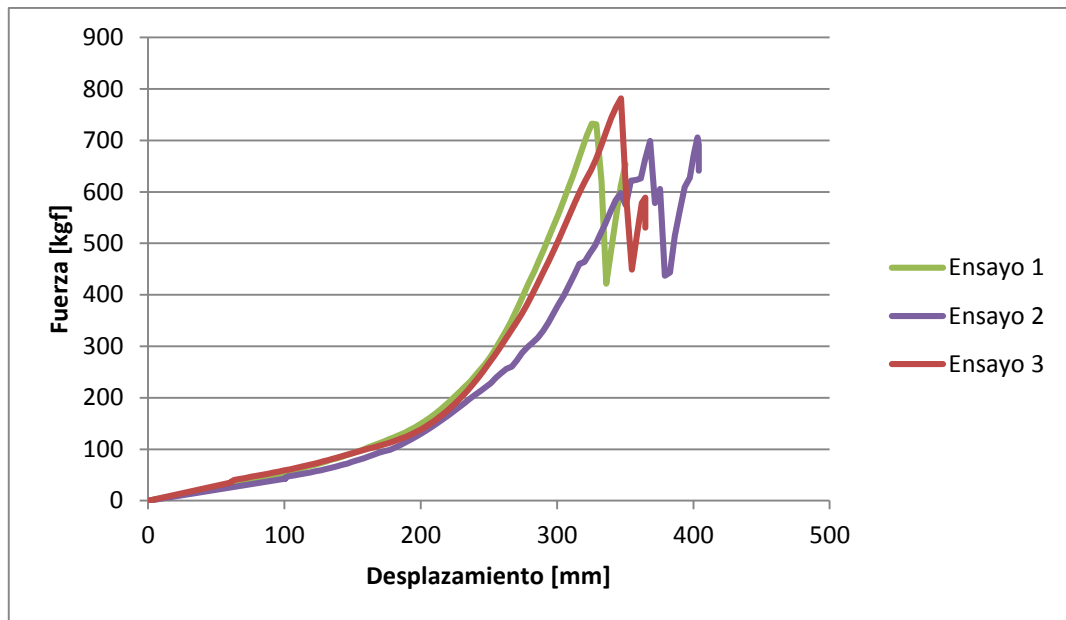
Para este trabajo de grado, se toma como sección simple al menor grado de unión que tiene la geomalla, es decir, el mecanismo que une a un aro de llanta con dos sogas de polipropileno; es la unión de estas secciones lo que al final genera el “tejido” que se llamaría geomalla.

En este trabajo de grado se ha trabajado para determinar propiedades a tracción que sean relevantes para, en el futuro generar conocimiento suficiente que pueda determinar que la geomalla compuesta de aros de llantas sea una opción confiable y válida a la hora del mejoramiento estructural de suelos blandos.

En la sección 2.1 se mostró como por medio de un montaje se logró generar una serie de curvas “Fuerza vs. Deformación” que den imagen de las propiedades de la sección mecánica previamente descrita.

La deformación fue dada por un potenciómetro que midió el desplazamiento de toda la sección.

Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, con el acompañamiento del profesor Carlos Blandón y Jhonatan Betancourt. Se realizaron 3 ensayos de tracción para secciones simples, los cuales dieron como resultado las siguientes curvas:



Gráfica 1. Curvas fuerza vs. deformación para ensayos de tracción en elementos simples.

La forma de los aros de llanta permite una gran deformación de los elementos antes de que estos tomen altos valores de carga, sin embargo cuando este se encuentre en el suelo, la deformación inicial será menor, haciendo que las cargas en las sogas se desarrollen más rápido.

La rigidez en cada uno de los ensayos ha sido calculada en la zona donde ya el aro de llanta se ha deformado lo suficiente y el mecanismo aro-soga comienza a trabajar en conjunto, es en este lugar donde se genera resistencia a tracción.

Tabla 4. Rigidez y fuerza última para secciones sencillas.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Fuerza última [kgf]	732,64	705,52	781,52	739,89
Fuerza última [N]	7179,86	6914,14	7658,87	7250,96
Desplazamiento en el punto de falla [mm]	235,45	302,99	287,02	275,15
Rigidez [N/m]	58396,53	37186,21	43882,54	46488,43

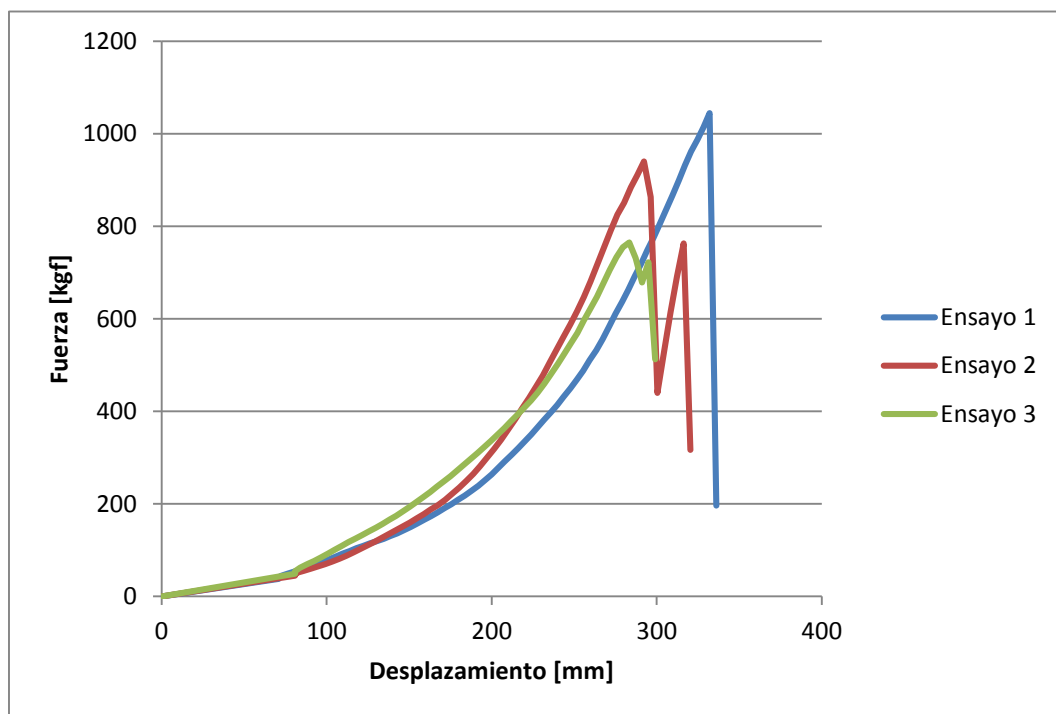
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2 TRACCIÓN PARA SECCION DOBLE

La geomalla propuesta está compuesta por varias uniones simples, que son la unión más básica de la geomalla, para estudiar cómo se comporta una unión en área se ha propuesto trabajar con un aro de llanta unido por tres sogas; es la distribución de estas sogas la que permite estudiar el caso. Se propone entonces que las sogas tengan una separación de 120° entre sí, para estudiar como la geomalla se comporta a tracción por una unidad de área.

La deformación fue dada por un potenciómetro que midió el desplazamiento de toda la sección.

Mediante el montaje mostrado en la sección 2.2 se lograron medir la fuerza y la deformación asociada a esta que soporta la probeta de geomalla. Con estos dos datos se hicieron 3 curvas fuerza vs. deformación ; con las curvas se logra determinar la distancia inicial que se desarrolla por la deformación del aro de llanta y no tiene gran capacidad de carga, la normativa ASTM D6637 le da el nombre de “slack displacement” que traduce al español de forma literal “desplazamiento holgado”. La pequeña carga que se logra desarrollar durante el “desplazamiento holgado” está determinada también por la normativa como “Slack Tension” (tracción floja).

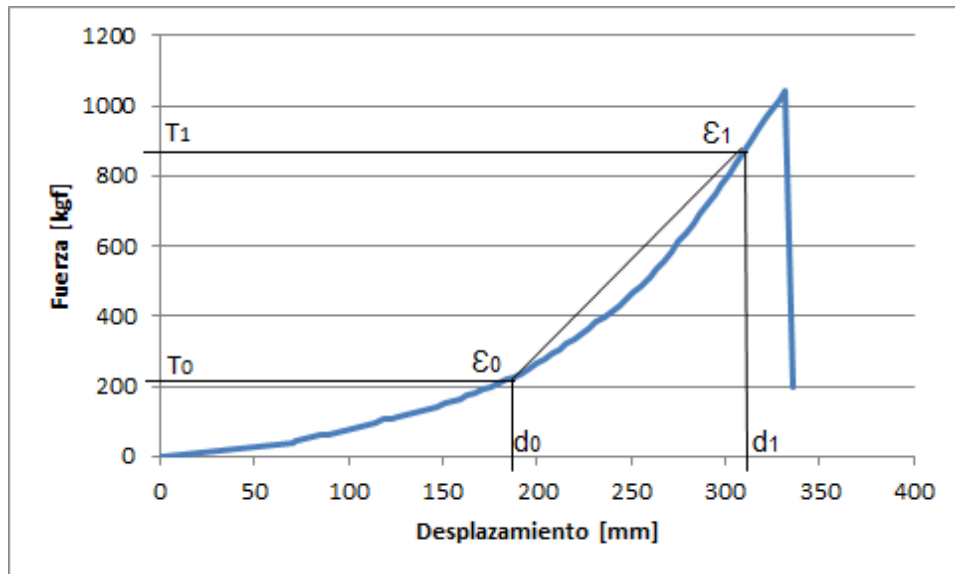


Gráfica 2. Curvas fuerza vs. deformación para ensayos de tracción en elementos dobles.

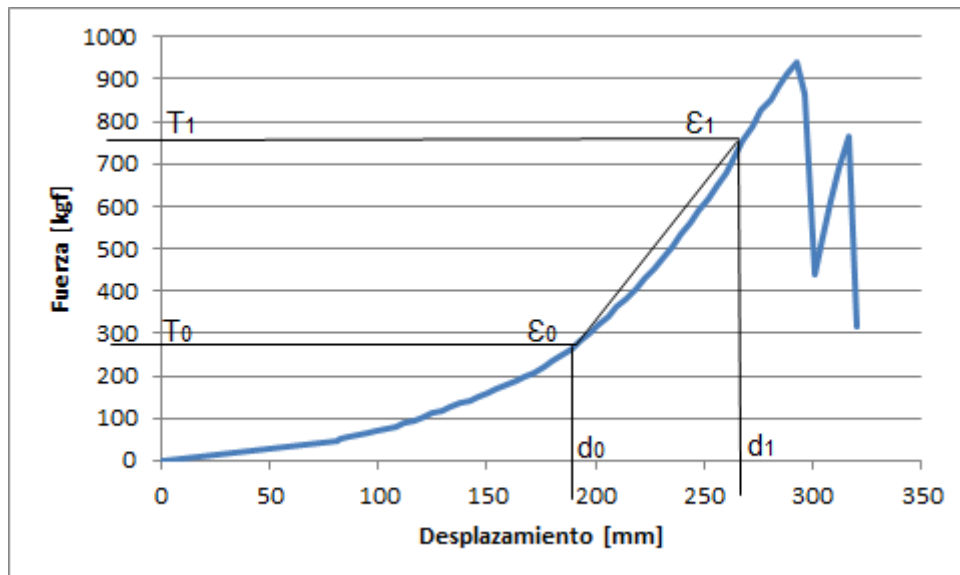
El punto de tracción holgada y desplazamiento holgado se tomará en 200 mm, pues este punto es en promedio donde el aro de la llanta se ha deformado lo suficiente como para

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

que el mecanismo aro-sogas comience a desarrollar resistencia a la carga, estos puntos son caracterizados como T_0 para la tracción de holgura y d_0 para el desplazamiento de holgura. Los puntos T_1 y d_1 se encuentran más avanzada la carga, donde ya la soga y el aro de llanta se deforman conjuntamente conforme sufren un mayor esfuerzo. Se puede notar como la pendiente de la curva en ambos puntos es distinta, esto demuestra que la rigidez es distinta también.

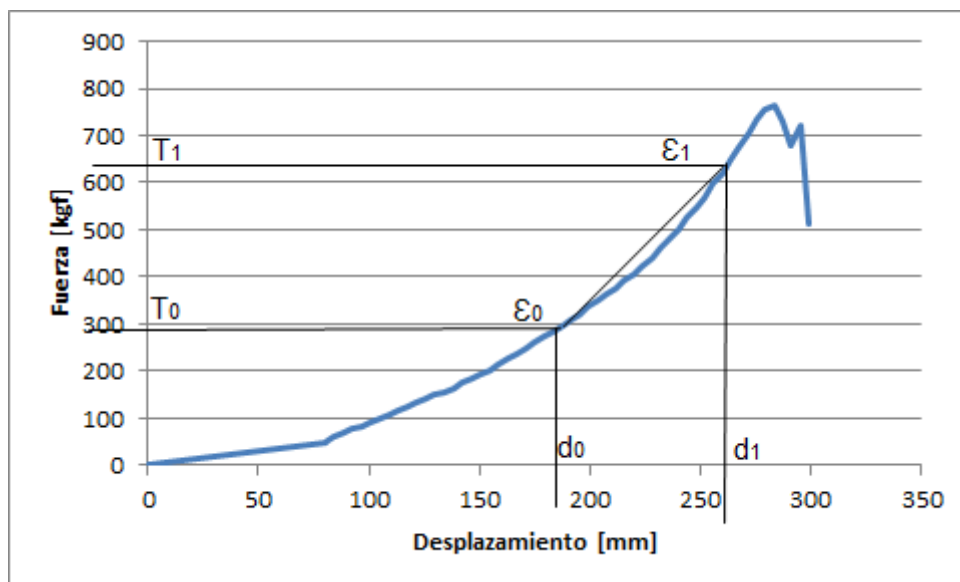


Gráfica 3. Disposición del punto de tracción y desplazamiento holgado en el ensayo 1 de sección doble.



Gráfica 4 Disposición del punto de tracción y desplazamiento holgado en el ensayo 2 de sección doble.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Gráfica 5. Disposición del punto de tracción y desplazamiento holgado en el ensayo 3 de sección doble.

En la normativa ASTM D6637 pide que se caracterice la resistencia a tracción por ancho en los especímenes, es decir, calcular la fuerza equivalente por unidad de distancia horizontal usando la siguiente ecuación:

$$\alpha_f = [(F_p - T_0)/N_r] \times N_t$$

Donde α_f es la fuerza equivalente por unidad de ancho, F_p es la fuerza máxima observada, T_0 es la tracción de holgura, N_r la cantidad de elementos ensayados y N_b la cantidad de elementos por unidad de ancho. El ancho de la sección ensayada es el grosor del aro de llanta, 0.455 m.

Tabla 5. Valores de fuerza equivalente por unidad de ancho.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Fp [N]	10237,93	9210,41	7495,65
Deformación [%]	62,41	59,38	58,62
Slack Tension [N]	2583,57	3124,12	3293,09
Nr	2,00	2,00	2,00
Nt	4,40	4,40	4,40
α_f [N/m]	16822,76	13376,47	9236,38

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

También se pide en esta normativa que se caracterice el módulo de secante que es el esfuerzo dividido por deformación en cualquier carga o deflexión. Se calcula mediante:

$$J_{sec} = (\alpha_f \times 100) / \epsilon_p$$

Donde J_{sec} es el módulo de secante a la elongación correspondiente al punto ϵ_1 en cada una de las gráficas, α_f es la fuerza equivalente por unidad de ancho y ϵ_p es la deformación correspondiente en porcentaje al punto ϵ_1 .

El módulo secante es la pendiente angular de la recta trazada desde el origen al punto de la curva que corresponde a un alargamiento ϵ_p o bien el resultado del cociente de la carga específica que produce un alargamiento relativo del $\epsilon_p\%$ (Pons, 1995).

En algunos casos es conveniente utilizar como módulo de elasticidad (para valores cercanos a la recta en curvas donde se presenta gran convección) el módulo de secante como expresión práctica para fibras (Pons, 1995).

Tabla 6. Valores del módulo de secante para el punto ϵ_1 en ensayos de sección doble.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
α_f [N/m]	16822,76	13376,47	9236,38
ϵ_p [%]	67,50	34,75	30,00
J_{sec} [N/m]	24922,61	38493,43	30787,94

Tabla 7. Resistencias a la tracción para 2%, 5% y resistencia última.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Resistencia a la tracción 2% de deformación [kN/m]	5.88	6.95	7.40	6.74
Resistencia a la tracción 5% de deformación [kN/m]	6.18	7.32	7.58	7.03
Resistencia última a la tracción [kN/m]	16.82	13.38	9.24	13.15



Ilustración 15. Deformación de la llanta después del ensayo.



Ilustración 16. Desgaste sufrido por el talón después del ensayo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 17. Falla de la soga después del ensayo.

3.3 DETERMINACIÓN DE TEJIDO U ORGANIZACIÓN MATRICIAL

En función de establecer qué tipo de organización matricial se planteará y ensayará en el trabajo de grado, se propone la formación de un modelo digital de la geomalla; este modelo será sometido a una carga que asemeje la soportada por la geomalla real bajo características similares. Se aclara que para límites de este trabajo de grado solo se somete la geomalla cargas monotónicas, se propone un estudio futuro de esta geomalla para cargas cíclicas que modele de una forma más realista la naturaleza de esta.

Se plantea modelar dos tipos de organización para geomalla, que difieren en la cantidad de aros de llantas que se interconectan entre sí; estas son tres y cuatro llantas como se muestra en la Ilustración 18.

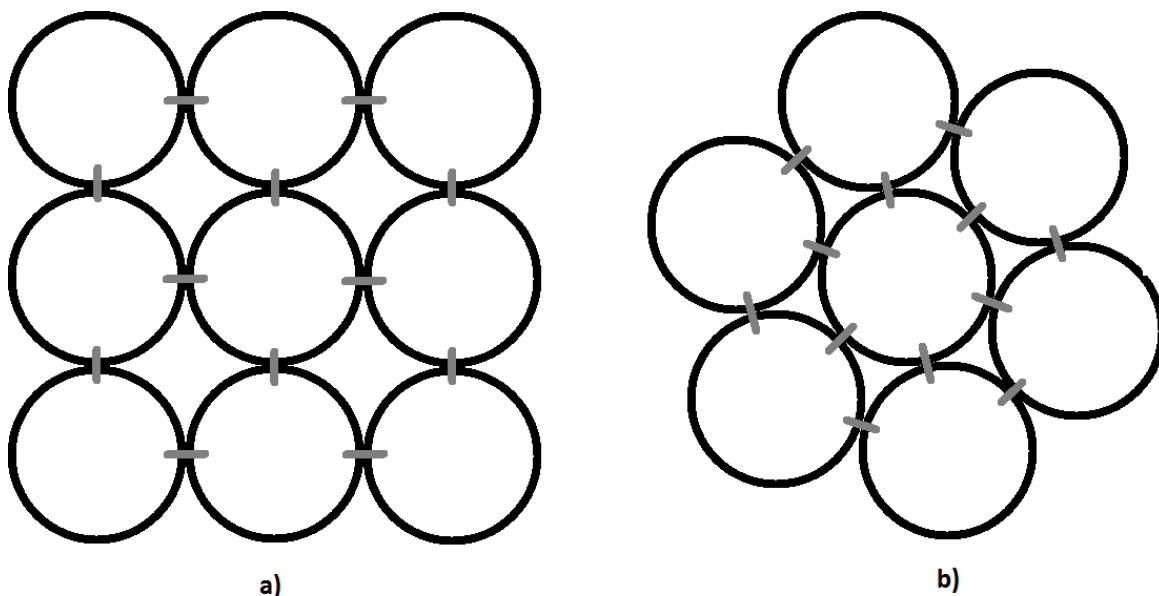


Ilustración 18 Geometrías básicas de geomallas propuestas

El modelo de geomalla a) está compuesta por un aro llanta interconectado con otros 4 aros de llantas, que semejan a una organización matricial cuadrada o un arreglo rectangular o cuadrado. El modelo de geomalla b) se compone de un aro de llanta interconectado de otros seis aros, que podrían asemejar a una organización hexagonal (arreglo triangular de sus nodos), pero puede ser simplificada a la unión de varias secciones triangulares como se muestra en la Ilustración 19.

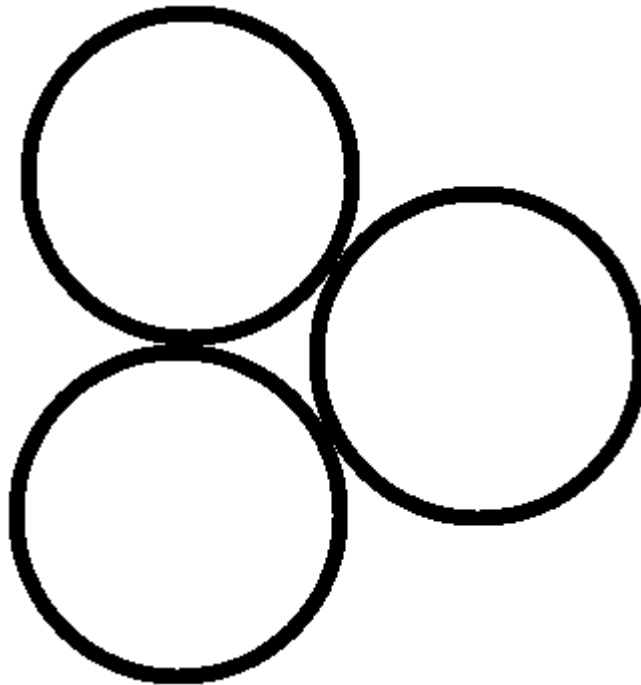


Ilustración 19 Simplificación del modelo hexagonal, como modelo triangular.

Estos dos tipos de tejido serán simplificados para una carga que simule la fuerza real que soporta la geomalla en un terraplén bajo una carga monotónica. Esta simplificación obedece a la in tracción de determinar cuál de las dos organizaciones matriciales tienen un menor índice de demandas a la hora de soportar una carga axial monotónica.

3.3.1 MODELACIÓN DIGITAL

Se utiliza el programa digital Phase 2.0 v 9. Este utiliza un análisis estático de elementos finitos a partir de una matriz de rigidez:

$$K\Delta U = P - F \quad (14)$$

Donde P representa el vector de cargas aplicadas, F el vector de fuerzas internas y ΔU el vector de desplazamientos modales. Esta forma de trabajo es el común en software contemporáneos.

Se escogió la modelación mediante este software por su capacidad de cálculo y la disponibilidad de este en la Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Se planteo el siguiente diseño de talud para modelar las geomallas:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

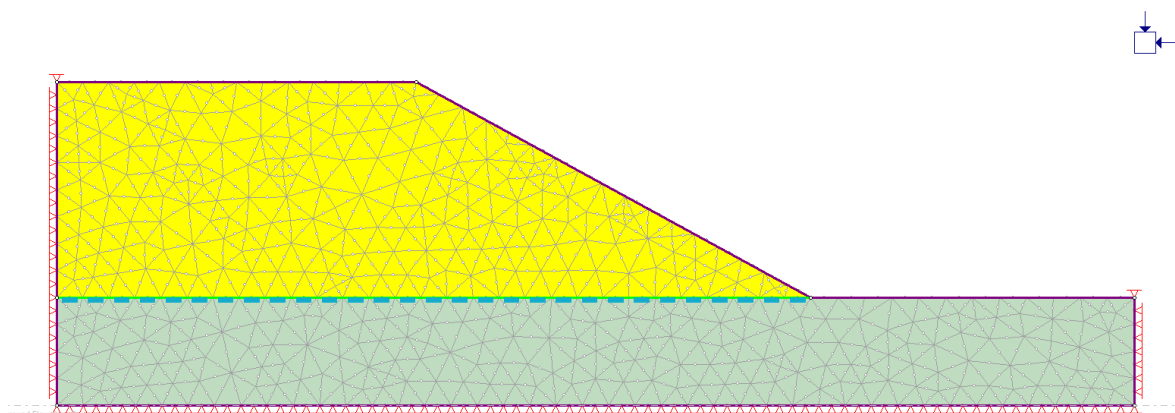


Ilustración 20. Forma del terraplén modelado.

El terraplén modelo tiene 6 metros de altura de arena, con una base de arcilla de 3 metro de profundidad. La base de arcilla tiene 30 metros de longitud, el terraplén tiene 10 metros en su altura superior y una base de 21 metros.

El modelo se resolvió mediante un análisis de esfuerzo lineal, con Eliminación Gaussiana como método de cálculo; con un criterio de falla bajo la teoría de Mohr-Coulomb. La carga ejercida en el modelo es dada por el peso del terraplén de arena.

3.3.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados en el modelo son: la arena de relleno, la base de arcilla y una geomalla equivalente a la propuesta en este trabajo de grado.

Para la arena y la arcilla se utilizaron los siguientes datos de entrada:

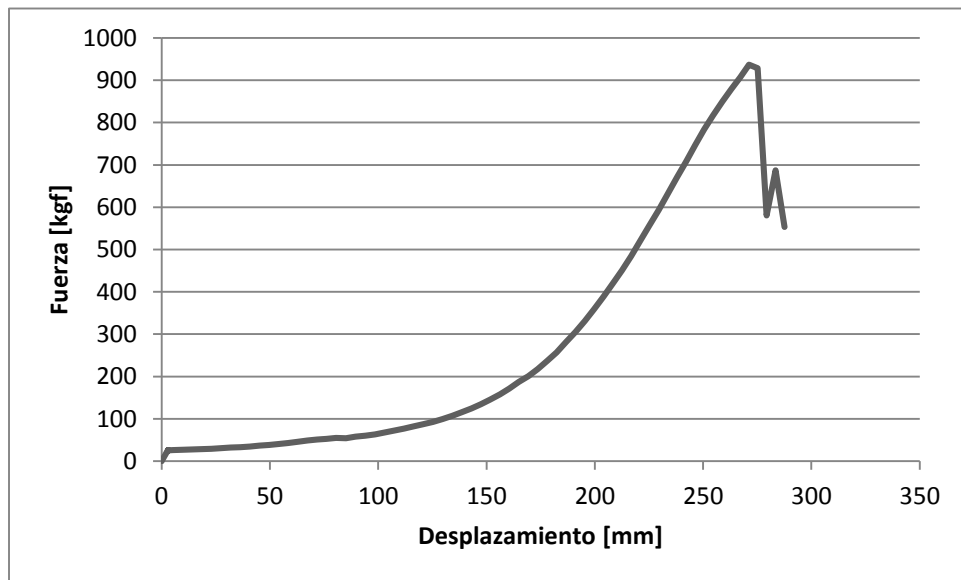
Tabla 8. Propiedades de entrada para los materiales de relleno en el modelo digital.

	Arena de relleno	Arcilla
Peso específico [kN/m ³]	17	20
Módulo de elasticidad [kPa]	50000	50000
Módulo de Poisson	0.4	0.4
Resistencia a tracción[kPa]	0	20
Cohesión [kPa]	0	20
Ángulo de fricción [°]	37	0

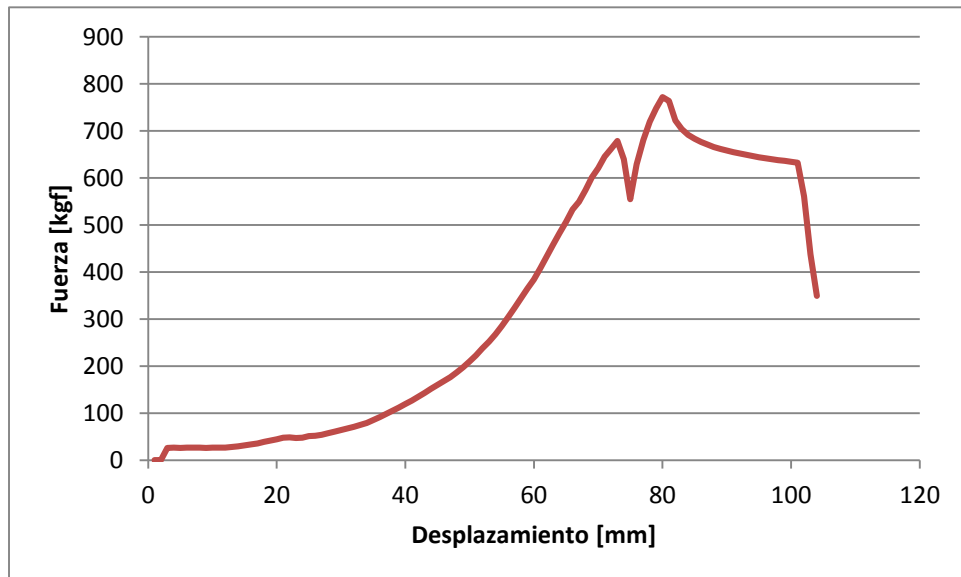
Las propiedades requeridas por Phase² para geomallas en el modelo se calcularon de la siguiente forma:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Con los ensayos realizados, uno para cada organización matricial, se lograron obtener los datos mostrados en las Gráfica 6 y Gráfica 7:



Gráfica 6. Fuerza vs. Deformación para organización triangular.



Gráfica 7. Fuerza vs. Deformación para organización cuadrada.

El módulo de elasticidad de las geomallas es difícil de establecer pues el elemento utiliza materiales diferentes y estos no trabajan unidireccionalmente. Es por eso que se adaptó a partir de las rigideces encontradas mediante la ecuación:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$K = \frac{EA}{L} \quad (15)$$

La rigidez encontrada experimentalmente fue para un ancho y un largo de 60 cm y un grosor de 4 cm, que es el grosor de los aros de llantas con su talón. Esta rigidez se toma a un 85% de la deformación, donde el mecanismo aro de llanta- soga trabaja en conjunto.

Tabla 9. Rigidez y módulo de elasticidad estimado para organizacioens cuadradas y triangulares.

Tipo de organización	Cuadrada	Triangular
Rigidez [N/m]	53186.48	78511.46
E estimado [N/m^2]	1329662.07	1962786.48
Carga última [N]	9181.03309	7566.05103

3.3.3 RESULTADOS

La fuerza axial obtenida en el modelo digital soportada por las geomallas de organización triangular y cuadrada son las siguientes:

Se presenta la respuesta generada por el programa de interpretación de Phase² de la siguiente forma:

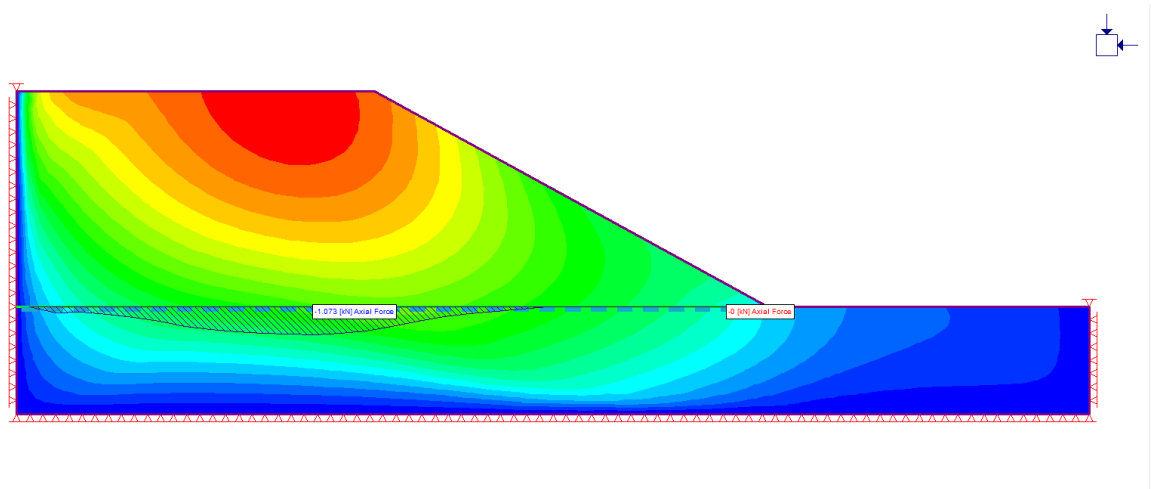


Ilustración 21. Resultado entregado por modelo digital.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

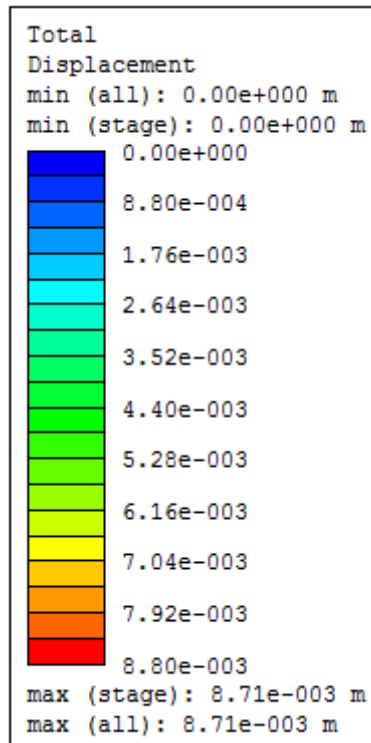


Ilustración 22. Leyenda de desplazamiento para el resultado entregado.

A continuación se presenta el detalle de los resultados:

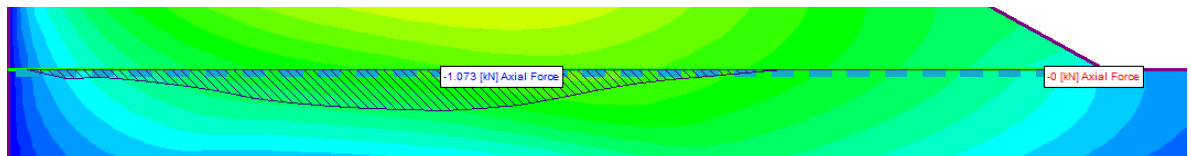


Ilustración 23. Detalle de fuerza axial soportada por la geomalla de organización triangular.

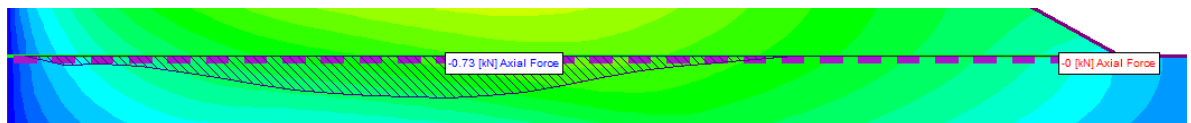


Ilustración 24. Detalle de fuerza axial soportada por la geomalla de organización cuadrada.

El resultado muestra una carga axial de tracción máxima de 0.73 kN para la geomalla de organización cuadrada, mientras que una carga axial máxima de tracción de 1.073 kN para la geomalla de organización triangular.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ORGANIZACIÓN MATRICIAL

Se pudo observar que mientras la resistencia última de la organización matricial triangular fue más alta que la de organización cuadrada, esta última tiene una mayor rigidez y por consiguiente un mayor módulo de elasticidad.

El programa de análisis por elementos finitos Phase² entregó una carga máxima a tracción axial de 1.073 kN para la geomalla de organización triangular, mayor a la respuesta dada por la geomalla de organización cuadrada (0.73kN) por una diferencia del 32% lo que lo hace una diferencia significativa; una razón para esto es que el módulo de elasticidad de la geomalla de organización triangular tiene una rigidez mayor que la geomalla de organización cuadrada, lo que se traduce en una mejor respuesta.

La geomalla triangular, en el modelo, es sometida a esfuerzos menores de tracción que los esfuerzos últimos desarrollados en las pruebas. Esto quiere decir que la geomalla en teoría controla las deformaciones a las que se es sometida en el terreno; pero pruebas futuras son necesarias para una comprobación de esta hipótesis.

La geomalla de organización cuadrada permite mayores desplazamientos, algo que no en todos los casos es recomendable para geomallas. Las geomallas son utilizadas en la mayoría de los casos para diseños gobernados por asentamiento, una mayor deformación se traduce en un mayor asentamiento local. Los asentamientos locales se pretenden evitar en el uso de geomallas como es explicado en la sección 1.4.1.

La fuerza última a tracción soportada por la sección de geomalla triangular es de 9181 N o 939 kgf, este valor es superior al promedio mostrado en la sección 1.6 que caracteriza la soga utilizada. Es posible que el alto nivel de carga soportado por el ensayo de organización triangular sea debido a una fortaleza superior a la promedio de la sección de geomalla.

4.2 TRACCIÓN PARA SECCIÓN SIMPLE

Se nota en la gráfica Fuerza vs. Deformación que hay dos picos de carga, esto se presenta por que la soga utilizada utiliza 3 cabos de polipropileno trenzados entre sí, estos cabos no siempre fallan al mismo tiempo; la carga máxima se presenta al fallar uno de ellos, los otros se logran deformar un poco más antes de fallar lo que se ve representado como estos picos en la curva.

Se puede notar en la Gráfica 1 un comportamiento similar entre las curvas de los ensayos 1 y 3. La curva del ensayo 2 además de tener el menor nivel de resistencia última, tiene una mayor deformación. Cabe aclarar que los aros de llantas de desecho pueden tener un nivel de desgaste diferente entre ellos, debido al nivel de desgaste que le dieron los

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

usuarios del automóvil a sus llantas en su vida útil. El nivel de carga más bajo y la mayor deformación pueden deberse a un mayor desgaste del aro de llanta.

En la Gráfica 1 se puede notar que la deformación y la carga se asemejan en las 3 curvas, esto hasta un desplazamiento de aproximadamente 220 mm, este desplazamiento es relativo a la deformación del aro de llanta (que para en el ensayo de tracción simple no está restringido para una deformación horizontal). La carga desarrollada para este momento se logra con una deformación menor en el suelo, es a partir de qué se llega a este momento que el mecanismo aro de llanta- sogas se deforma conjuntamente.

La “tracción de holgura” es desarrollada por una deformación del aro de llanta y de la sogas, esta última tiene una deformación mínima con respecto a la del aro de llanta y es por eso que se desprecia en algunos cálculos. Cuando la geomalla se encuentra emplazada en el terreno el suelo y las otras secciones de aros de llanta restringen la deformación que tiene el aro de llanta, es decir, se alcanza la fluencia y rotura de la sogas bajo una menor deformación general de la sección.

En todos los casos la falla se dio por falla de tracción en la sogas, esto era predecible dado a que el refuerzo de acero en los aros de llantas soporta fuerzas mucho mayores que la resistencia axial de la sogas de polipropileno, la sogas falló en el rango entre 700 kgf y 800 kgf, este valor concuerda con los datos suministrados por la empresa Compañía de Empaques en Medellín. Los aros de llanta resisten mucho más que esta carga, teniendo valores iniciales desde 15000 kgf.

Cabe afirmar que como se ve en las imágenes Ilustración 16 se presenta un desgaste en la capa de caucho que se encuentra en la punta del talón y recubre el aro de acero de la llanta, este aro de acero es el que transmite las cargas por la geomalla en conjunto con las sogas de polipropileno. El medio donde se encuentra enterrada la geomalla en la realidad está expuesto a altos flujos de aguas lluvias, además la capilaridad y los altos niveles de humedad natural que presentan los suelos blandos pueden generar corrosión en los aros de llantas si estos no tienen protección ante esto.

4.3 TRACCIÓN PARA SECCIÓN DOBLE

La concavidad de las curvas Fuerza vs. Deformación en geomallas es dicente de sus características a tracción. En cálculo la concavidad una función diferenciable $y = f(x)$ es positiva si la derivada de la función $f'(x)$ incrementa después de un intervalo, y es negativa si después de este intervalo la derivada decrece. En otras palabras, si la segunda derivada de la función $f''(x)$ es positiva entonces la gráfica es de concavidad positiva, y si la segunda derivada es negativa entonces la concavidad de la gráfica de $f(x)$ es convexa.

En una curva original de Fuerza vs. Deformación es originalmente cóncava en un intervalo, la corrección por holgura incrementa la rigidez a tracción a cualquier nivel de deformación del intervalo. En otras palabras, la corrección por holgura sobrestima la rigidez de la geomalla en el tramo seleccionado (Yuan, 2005).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El caso contrario sucede cuando la concavidad de la curva es convexa, en este caso la corrección por holgura disminuye la rigidez a tracción; lo que subestima la rigidez de la geomalla en el tramo seleccionado (Yuan, 2005).

Para los ensayos de sección realizados en la geomalla compuesta por aros de llanta de desecho y sogas de polipropileno se presentó en todas las gráficas una concavidad positiva; esto quiere decir que la corrección propuesta por la normativa ASTM D6637 puede haber sobrestimado los valores de rigidez propios de la geomalla. En todo caso estos valores se pueden compensar con el hecho de que el suelo y las otras secciones de geomalla a la hora de presentarse un caso real puedan restringir el desplazamiento, incrementando así la rigidez de la sección.

A continuación se presenta un resumen de geomallas comerciales y comunes en el medio con los valores de resistencia para deformaciones de 2% y 5%, así como para resistencia última.

Tabla 10. Datos de referencia para geomallas comerciales.

	Geomallas Biaxiales		Geomallas Uniaxiales				
Referencia	P-BX11	P-BX12	TT 045	TT 070	TT 090	TT 120	TT 160
F d2 [kN/m]	4.1	6	15	20	29	38.5	45
F d5 [kN/m]	8.5	11.8	29	38	55	74	60
Fu [kN/m]	12.4	19.2	51.5	70	93.5	121.5	160

Estos valores sirven para comparar los valores obtenidos por las secciones de geomalla ensayadas, estos valores se muestran en Tabla 7.

Se puede ver que los valores obtenidos en los ensayos realizados se encuentran entre las geomallas biaxiales, es de suponerse pues la geomalla planteada es una geomalla biaxial dado que tiene la misma organización y separaciones en ambas direcciones del plano.

La geomalla compuesta por aro de llantas de desecho obtiene valores de carga menores a las geomallas uniaxiales, esto en parte a que la soga que une los aros de llantas tiene un valor de resistencia bajo con respecto al espaciamiento que existe entre sogas por metro.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

5.1 CONCLUSIONES

Se ha determinado que la geomalla con una organización matricial de tipo triangular responde mejor a las cargas suministradas, esto se debe a que posee una mayor cantidad de uniones de sogas por unidad de área; la mayor cantidad de sogas permite que estas distribuyan mejor la carga. Las sogas además generan un mejor confinamiento del aro de soga, lo que disminuye su deformación, mejorando así la rigidez propia de la geomalla.

En una geomalla con organización matricial cuadrada las uniones de soga son sometidas a un mayor esfuerzo debido a que cada aro de llanta está distribuyendo la carga a su alrededor por medio de menor cantidad de sogas. La geomalla de organización cuadrada permite mayores deformaciones del aro de llanta, esto no solo genera deformaciones en la geomalla sino que también puede en casos extremos generar dobleces en el cable de acero que es el encargado de generar la mayor parte de la resistencia, una doblez agudo en el cable de acero genera un desgaste de este y disminuye la resistencia a tracción que este puede soportar.

El desgaste de la protección del talón, que recubre el cable de acero y lo protege de una posible corrosión se encontró en menor cantidad para la organización matricial triangular, esto debido a que, como se aclaró anteriormente, la mayor cantidad de sogas permite una mejor distribución de los esfuerzos traccionantes.

Se encontró en los ensayos a tracción realizados, que la falla se daba siempre por rotura en la soga de polipropileno, se determinó que la resistencia a tracción de la geomalla está ligada a la resistencia a tracción de la soga. La soga a su vez es muy susceptible a desgaste por cortante, algo en lo que se tiene que tener especial cuidado debido a que esta está bajo el suelo, que puede tener rocas filosas que generen un desgaste a la soga, reduciendo así la capacidad de la geomalla.

Se estima que con un cambio de unión entre los aros de llantas, utilizando una soga con mayor resistencia a la tracción, o generando una unión mediante pegamento entre los aros de llanta se puede incrementar de manera importante la resistencia a la tracción de la geomalla. Se recomienda este tema como un potencial tema para futuros estudios.

Cuando se comparó la resistencia de la geomalla con geomallas comerciales, se encuentra que esta tiene en general baja resistencia a la tracción. Se esperaría que la geomalla sea usada en situaciones donde la carga aplicada sea baja, ya sea con terraplenes de pequeñas dimensiones o bien con cargas bajas.

5.2 CONSIDERACIONES FINALES

Es esencial tener un riguroso proceso de calificación a la hora de escoger los aros de llanta utilizados en la geomalla. Se encontró durante este trabajo que muchos centros de deposición de llantas de desecho reciben sus llantas en muy mal estado; es recomendable captar las llantas utilizadas directamente desde los montes de llantas escogiendo las que no han sufrido altos desgaste en los aros.

El trabajo de corte de los aros de llantas, y su amarre puede llegar a ser laborioso. Sería recomendable hacer un estudio financiero donde se compare un posible escenario, calculando los costos relacionados a la construcción de la geomalla compuesta por aros de llanta desechada y una geomalla equivalente comercial.

Como estudios futuros también se propone incursionar en la relación entre la geomalla propuesta y el suelo utilizado como relleno, debido a su gran tamaño de aro, se podría utilizar roca de alto diámetro para reducir costos. También se propone hacer ensayos para la geomalla propuesta en las dos direcciones principales simultáneamente, esto para complementar los ensayos de tracción realizados en este trabajo de grado.

BIBLIOGRAFIA

- Blumekranz, S., Mora, J., & Toro, P. A. (2005). *Desarrollo de un producto a partir de material fabricado con desecho de llanta*. EAFIT.
- Chacón J, J. T. (2012). *Uso de geomateriales para reforzamiento de suelos*. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/766>
- Chen, Q. (2007). *An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil foundation*. Louisiana State University.
- Construmática. (2011). Geotextiles. Retrieved December 16, 2014, from <http://www.construmatica.com/construpedia/Geotextiles>
- Doradla, A. K. (2005). *Failure mode of the weftless bead and evaluation of improved failure*. University of Kentucky.
- Fannin, R. J. (1986). *Geogrid Reinforcement Of Granular Layers On Soft Clay- A Study At Model And Full Scale*. Magdalen College.
- Harris, J. R., & Evans, L. R. (2013). *Evaluation of Laboratory Tire Tread and Sidewall Strength (Plunger Energy) Test Methods* (p. 70). Washington.
- Koernel, R. M. (2005). *Design with Geosynthetics*. (M. J. Horton, Ed.) (5th ed., p. 818). Pearson Education, Inc.
- MAVDT. Resolución Número 1457. , Pub. L. No. 1457 (2010). Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Retrieved from http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/articles-241763_Archivo_pdf.pdf
- Pons, J. M. (1995). Método de ensayo para la determinación del módulo inicial de elasticidad de las fibras individuales *. *Annales Scientifiques Textiles Belge*, 2, 11. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/6177/1/Article04.pdf>
- Ramirez C., P. (2011). *Estudio de Impacto Ambiental y Gestión de Neumáticos Fuera de Uso (NFU)*. Universidad Mayor. Retrieved from <http://www.ingenews.cl/web/download/publicaciones/137.pdf>
- Rodrigo, P., & Orozco, O. (2004). Diseño conceptual de un banco de pruebas para determinar rigidez en llantas neumáticas. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

Tobon G, J. A., & Valencia E, H. H. (1986). *Tierras Reforzadas con Base en Llantas de Desecho*. Universidad Nacional de Colombia.

Yuan, Z. (2005). Effects of slack correction on tensile stiffnes of geosynthetics. Norcross: SGI testing Services. Retrieved from http://www.tencate.com/amer/Images/TN_slack_tcm29-27073.pdf

ANEXO 1

Anexo 1. Datos de ensayo a para geomalla de organización triangular.

Ensayo Triangular		Ensayo Triangular		Ensayo Triangular	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0	107.462127	72.296207	250.536616	783.774896
2.938066	25.968102	111.880574	77.147665	254.706062	817.03987
2.968147	26.119253	116.302158	82.226855	258.874234	850.02316
2.980083	26.049579	120.8175	87.671167	263.010734	879.473997
2.978355	25.968154	125.308343	92.546848	267.139124	907.079014
2.977108	25.861046	129.663446	99.708727	271.180244	936.840111
2.996909	25.726317	134.134354	107.472512	275.218995	928.689581
2.942974	25.878258	138.526648	115.207283	279.386572	580.278273
2.93529	25.717599	142.983987	124.145399	283.467844	687.128929
2.968313	25.735571	147.390748	134.397058	287.612703	553.510935
5.150632	26.231033	151.753598	145.864393	291.798278	23.194311
9.636855	26.876304	156.145095	158.09015	296.023382	23.190183
14.084468	27.681646	160.509584	171.666029	300.336837	23.358315
18.509218	28.501785	164.929628	186.919426	304.284313	23.127863
23.004582	29.414718	169.329902	200.595088	305.116237	23.032795
27.473951	30.588981	173.666964	217.400416	305.135099	22.876459
31.860672	31.968131	178.028277	236.875683	305.156001	22.908416
36.296089	33.197032	182.353821	257.215453	305.109229	22.956564
40.753221	34.787404	186.698702	280.733536	305.1206	22.937616
45.194044	36.385867	191.062392	305.234875		
49.5588	38.450472	195.376766	330.740215		
54.011356	40.531119	199.716773	358.868894		
58.40488	42.899933	204.024679	389.221929		
62.884008	45.647169	208.366478	420.254413		
67.294836	48.560048	212.565261	450.628928		
71.749247	51.287069	216.820879	484.915815		
76.142477	52.739701	221.033902	521.387506		
80.562473	54.826712	225.245534	556.980963		
85.05384	53.986827	229.482288	593.17234		
89.580739	57.679886	233.668104	631.137853		
94.102959	59.932822	237.871903	670.812408		
98.516152	63.459947	242.186278	708.749629		
102.972026	67.607203	246.387978	747.142621		

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 2. Datos de ensayo a para geomalla de organización cuadrada.

Ensayo Cuadrado		Ensayo Cuadrado		Ensayo Cuadrado	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0	107.019004	85.138631	254.615265	574.023024
2.888051	26.205342	111.557363	91.254859	258.892458	600.898975
2.934968	26.243081	116.065258	97.942683	263.186032	620.712123
2.922871	26.20336	120.631671	104.59589	267.428215	645.503343
2.933843	26.509492	125.224257	111.767164	271.617868	661.883406
2.920276	26.453825	129.760997	119.290022	275.848115	678.956262
2.922949	26.39234	134.243081	126.951743	280.046686	639.747289
2.898492	26.189352	138.856984	135.01219	284.27033	554.780459
2.915147	26.254749	143.363656	143.278941	288.395602	628.725629
2.891143	26.527381	147.897947	151.739589	292.62533	680.959553
3.157744	26.478317	152.412215	160.077019	296.762753	719.522889
6.713299	27.781258	156.952963	167.955327	300.942243	748.063102
11.346944	29.311038	161.467917	176.414544	304.568488	772.046023
15.840029	31.267551	165.982517	186.411059	305.158524	763.974571
20.433659	33.274694	170.467037	197.358776	305.142944	722.266004
25.019249	35.696902	174.953872	209.546436	305.136881	703.627186
29.502118	38.556835	179.483902	222.944265	305.135405	691.791466
34.10304	41.433718	183.957714	237.328726	305.166072	683.385524
38.668099	44.399887	188.459829	251.934221	305.099011	676.752316
43.222967	47.446325	192.901016	267.57244	305.172482	671.18209
47.745538	48.240668	197.449137	285.147367	305.159965	665.935006
52.210834	46.948501	201.906542	304.447193	305.156064	662.044004
56.812587	47.802781	206.376329	323.891829	305.125441	658.16944
61.344321	50.895944	210.852727	344.169949	305.131729	654.894047
65.902148	51.79338	215.273516	365.045118	305.187277	652.123423
70.422722	54.077558	219.643713	384.058095	305.135026	649.50035
74.997066	57.176243	224.066436	407.478913	305.173894	646.645269
79.466136	60.463743	228.399855	433.171637	305.179879	644.151181
84.030874	63.704399	232.786184	458.22488	305.151993	642.275496
88.704466	67.184553	237.063666	482.623597	305.206709	640.136068
93.307815	70.589623	241.616586	507.308551	305.206446	637.990098
97.925453	74.939442	245.954603	532.818279	305.151647	636.415984
102.455882	79.274225	250.265803	549.667911	305.151954	634.547512

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 3. Ensayo 1 de tracción para sección simple.

ENSAYO 1		ENSAYO 1		ENSAYO 1	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0	214.248191	176.657238	339.798754	490.276847
101.154858	49.537418	217.964525	184.981368	343.283748	553.529213
101.137336	49.467088	221.675722	193.950971	346.779301	610.823901
101.157888	49.571261	225.31592	203.062948	350.245884	653.861316
101.112694	49.868183	228.991447	212.471579	353.874725	288.714876
101.143969	51.066132	232.60625	221.919172	357.318456	22.624682
102.261142	54.551569	236.198264	231.251825	359.468961	22.881331
106.122563	57.769044	239.861331	242.158964	359.562573	23.082166
110.170159	60.886096	243.573523	254.094929	359.55348	23.217655
114.113805	63.835977	247.165028	265.026306	359.601329	23.097247
118.108362	66.875716	250.782282	278.494786	359.567521	23.267919
122.154302	69.830872	254.380179	293.008425		
126.139291	72.854525	258.008457	308.975695		
130.081979	76.038926	261.61708	325.96121		
134.01765	79.166931	265.312103	343.968489		
138.028776	82.173424	268.848672	362.988307		
141.977397	85.332112	272.447618	383.252143		
145.948391	88.610097	275.967661	403.922223		
149.862486	92.147482	279.588724	424.625355		
153.751344	95.823865	283.148762	445.365773		
157.74722	99.571554	286.674765	466.957437		
161.582369	103.515763	290.284369	488.032047		
165.366228	107.372766	293.823212	511.026004		
169.16087	111.277477	297.374733	533.761009		
172.953935	115.186741	300.915304	556.097893		
176.71293	119.050025	304.477688	580.330959		
180.453644	123.049282	308.027368	605.074187		
184.24131	127.325106	311.566633	631.217049		
188.11162	132.026538	315.080278	656.609089		
191.926764	137.028781	318.522189	683.74233		
195.775215	142.531725	322.000837	710.484237		
199.482047	148.41449	325.450533	732.638489		
203.282404	154.858085	328.896896	731.387824		
206.998516	161.450052	332.478695	621.882802		
210.647057	168.739179	336.191106	421.416053		

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 4. Ensayo 2 de tracción para sección simple.

ENSAYO 2		ENSAYO 2		ENSAYO 2	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0	212.455085	150.94941	346.659941	597.350995
100.562862	42.979733	216.274516	158.262447	350.416872	574.203785
100.596533	43.072625	220.262088	165.897636	354.128459	621.701549
100.565818	43.143298	224.15815	173.32635	357.87597	623.35345
100.54684	42.874145	228.060379	181.192848	361.451429	626.215439
100.5957	42.990806	231.887251	189.203559	364.61652	662.482429
100.591142	44.476714	235.78373	197.347994	368.269504	698.929584
102.711135	46.995897	239.650164	205.061932	371.901072	578.506962
106.789134	48.927755	243.522685	212.696801	375.476948	605.593962
110.749089	50.655158	247.36387	220.209912	379.027141	437.215534
114.673114	52.602536	251.304803	228.085128	382.747949	443.594268
118.637824	54.744922	255.138739	238.471613	386.411995	513.963754
122.600468	56.941894	258.994509	248.206642	390.03264	564.838899
126.509558	59.102453	262.879091	256.343544	393.667547	609.409008
130.478676	61.382511	266.720741	260.285339	397.296787	627.581274
134.370775	63.805897	270.58212	273.05338	400.242547	671.863297
138.225591	66.37442	274.368415	287.014796	402.985445	705.524971
142.197325	69.245648	278.217954	298.225578	403.931509	691.505691
146.121402	72.306631	282.121683	307.274378	403.944994	677.311074
149.980962	75.536677	285.854188	316.586936	403.965229	668.234511
153.858108	78.933111	289.727668	329.832206	404.020934	661.056248
157.782606	82.245393	293.567181	345.661349	403.954666	655.6109
161.716951	85.899505	297.428937	363.830776	403.982703	651.340874
165.605748	89.524983	301.21425	382.045006	403.981661	647.547801
169.47882	93.175161	305.045182	399.380198	403.982401	644.143938
173.387586	95.970187	308.87409	419.329654	403.980487	641.002589
177.26307	98.523384	312.688424	439.14415		
181.12138	102.935665	316.49242	460.041232		
185.04933	107.965299	320.190764	463.625163		
189.018209	113.429214	323.996653	479.825299		
192.973218	118.980261	327.772254	495.800482		
196.946077	124.877668	331.539284	517.287079		
200.762295	131.010355	335.302733	537.759089		
204.658181	137.276222	339.088883	561.489436		
208.565464	143.957965	342.950588	583.537556		

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 5. Ensayo 3 de tracción para sección simple.

ENSAYO 3		ENSAYO 3		ENSAYO 3	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]	Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0	181.17631	116.296143	320.927723	622.475745
60.963825	35.492678	185.268243	120.225964	324.754839	641.755341
60.963318	35.398423	189.301694	124.542269	328.612473	663.629063
61.005307	35.534128	193.375357	129.458953	332.381801	689.458916
60.95837	35.642197	197.472934	134.608093	336.13598	717.452703
61.003067	37.403554	201.4964	140.447069	339.914872	744.116173
63.14257	40.04135	205.588954	147.086991	343.473084	764.998152
67.298195	42.103928	209.621676	154.255687	347.022215	781.5169
71.395654	44.183174	213.606245	162.460363	350.928657	584.52924
75.464833	46.464022	217.70059	171.141404	354.996885	448.722284
79.554607	48.27583	221.752544	180.240424	358.651831	517.594694
83.640184	50.31119	225.741311	190.051297	362.24505	578.198997
87.71216	52.398125	229.817968	200.553794	364.707246	589.168523
91.755559	54.506497	233.781443	212.142268	364.75115	568.535907
95.821526	56.586742	237.761328	224.566952	364.745525	557.197876
99.908814	58.743605	241.854558	238.011774	364.789726	549.0324
103.976145	60.950405	245.842656	252.056529	364.810804	542.900853
108.065616	63.252444	249.826889	266.461965	364.772053	537.957412
112.044301	65.868922	253.877819	281.075716	364.772209	533.876053
116.118973	68.19271	257.889046	296.682066	364.763978	530.405988
120.174639	70.742979	261.846349	312.42968		
124.236855	73.415057	265.902495	328.694043		
128.327795	76.083647	269.89584	344.864896		
132.353668	79.023357	273.873997	361.619521		
136.354325	82.156637	277.840249	380.69157		
140.452324	85.154398	281.773158	401.08293		
144.477065	88.366032	285.735231	422.417654		
148.603789	91.55319	289.633128	442.915489		
152.724373	94.546584	293.561704	463.923315		
156.799155	97.521329	297.529325	486.527652		
160.792216	100.352851	301.510862	509.471241		
164.912145	103.257452	305.436035	532.358142		
169.006202	106.078005	309.325133	556.571761		
173.038162	109.138824	313.221865	580.720192		
177.088742	112.648334	317.058595	602.672447		

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 6. Ensayo 1 de tracción para sección doble.

Ensayo 1	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0
70.910893	37.565308
70.920998	37.570129
70.885647	37.651724
70.891764	39.02697
72.158171	44.304983
76.270089	49.086223
80.481081	53.8067
84.673684	58.643032
88.890229	63.629919
93.094311	68.962704
97.244664	74.398067
101.466113	80.114966
105.594771	86.076481
109.784236	92.277844
113.941812	98.230724
118.085271	104.135917
122.177728	109.443436
126.326716	114.66602
130.456721	119.702956
134.507483	124.579457
138.620095	130.27103
142.65713	136.427739
146.749601	142.950791
150.886891	150.124033
154.971031	157.759572
159.164989	165.68725
163.278751	173.740052
167.394782	181.989114
171.46493	190.558099
175.543284	199.451441
179.672975	208.478335
183.716565	217.935882
187.790666	227.969145
191.908818	239.007109
195.899597	250.972245

Ensayo 1	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
199.882858	263.630011
203.911358	277.249225
207.928959	291.521265
211.926493	305.629413
215.971983	319.994062
219.918351	334.526604
223.943088	349.831383
227.87498	366.06124
231.826514	382.044694
235.811039	397.476191
239.759947	413.718209
243.687521	431.824698
247.596595	449.685386
251.588587	468.000175
255.500441	487.579465
259.403608	510.358357
263.298892	531.911589
267.292805	556.184891
271.187109	583.22407
275.049998	610.655501
279.024525	636.724352
282.863009	662.787376
286.678197	691.684686
290.509663	718.753744
294.304712	747.829953
298.138729	775.688348
301.879919	804.543441
305.721371	835.275209
309.516204	866.393432
313.482528	899.047715
317.159145	931.448329
320.890255	961.767036
324.635505	987.219302
328.321824	1014.16172
332.067044	1044.68694
336.134479	196.442675

Ensayo 1	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
338.43286	26.573645
342.018533	26.247656
345.897142	26.280873
349.809883	26.172833
352.30545	26.138298
352.414973	26.508761
352.414203	26.724267
352.448372	26.424826

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 7. Ensayo 2 de tracción para sección doble.

Ensayo 2	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0
80.899726	44.915332
80.898319	44.786802
80.880972	44.795848
80.897876	46.014295
81.942238	50.902546
86.098467	55.389471
90.451715	59.985717
94.760272	64.727772
99.018308	69.701597
103.390887	75.237869
107.707168	81.2799
111.959825	87.804912
116.30577	95.106579
120.59633	102.836761
124.863744	110.675302
129.143548	118.49535
133.344834	126.566571
137.622827	134.846756
141.936533	143.110049
146.182873	151.391329
150.424003	159.880529
154.616424	168.455497
158.908067	177.449503
163.179472	187.790082
167.45282	197.313615
171.796025	208.915746
176.096905	221.906863
180.287877	235.242692
184.560085	249.318555
188.907668	264.983702
193.035927	281.570782
197.266014	300.03591
201.536674	318.787991
205.808563	339.088717
209.985327	361.157365

Ensayo 2	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
214.219983	383.454743
218.442602	406.239052
222.644475	428.721222
226.81491	452.449014
231.01499	477.558846
235.160572	504.775546
239.306301	533.0896
243.464479	560.298677
247.584094	587.826613
251.687888	616.150166
255.809342	646.67584
259.922767	680.872152
263.994751	717.530372
268.088617	753.654117
272.111787	790.370506
276.180869	824.946886
280.289555	850.623062
284.308494	884.274192
288.322633	910.295096
292.35885	939.838252
296.426524	863.365502
300.525802	439.933562
304.495837	530.111934
308.438489	613.917988
312.37902	691.299715
316.292987	762.750655
320.480926	317.00408
324.496696	26.362208
328.505918	26.474718
332.556251	26.366537
336.616623	26.3634
340.654975	26.440384
344.471241	26.399999
345.501716	26.480232
345.546472	26.444497
345.520291	26.300074

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 8. Ensayo 3 de tracción para sección doble.

Ensayo 3	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
0	0
80.81625	49.023493
80.80034	49.132076
80.816625	48.999873
80.925177	54.46919
83.963917	62.204357
88.191091	69.565028
92.394925	76.872976
96.596508	84.590126
100.813555	92.667606
104.973311	100.958006
109.157656	109.22755
113.32313	117.224172
117.465405	125.165582
121.628533	132.763739
125.779165	140.74499
129.836879	148.652222
133.93557	157.065288
138.09927	165.562319
142.190876	174.41436
146.280063	183.701666
150.34696	193.580649
154.458852	203.859714
158.512266	214.455162
162.617229	225.477747
166.782922	236.838294
170.922644	248.22185
175.077026	259.884856
179.132076	272.306366
183.254187	284.56712
187.321224	297.261463
191.385891	309.937775
195.384693	322.499185
199.493007	336.029769
203.629943	350.171715

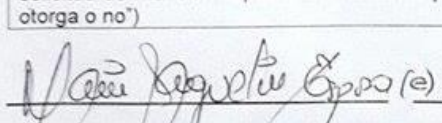
Ensayo 3	
Desplazamiento [mm]	Fuerza [kgf]
207.651471	364.066459
211.669728	378.059854
215.726727	392.584833
219.786645	408.112583
223.841514	423.485717
227.852194	440.397386
231.875445	460.198605
235.879607	480.300494
239.905831	501.386764
243.901313	524.285193
247.898983	546.305222
251.879162	568.927919
255.804384	596.231728
259.769786	621.098785
263.745051	647.360378
267.705152	676.269916
271.620398	705.865161
275.577089	733.093753
279.450422	754.801883
283.331534	764.861851
287.273596	731.240585
291.22297	678.335154
295.091265	722.348308
299.070311	512.282727
303.036619	26.010088
307.143649	26.106504
311.093291	25.83347
315.127046	25.928098
318.497007	25.8836
318.998261	25.874577
318.991228	25.897116
319.015905	25.918493
319.009194	25.896639

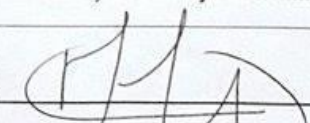
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

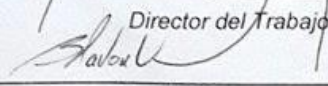


ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
ACTA DE EVALUACIÓN FINAL
DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)	23/06/2015				
Nombre del proyecto:	Caracterización Mecánica de Geomallas compuesto compuestas por llantas de desecho.				
Director del proyecto:	José Ignacio Sierra Valencia				
<table border="1"><tr><td>Nombre del estudiante</td><td>Programa Académico</td></tr><tr><td>Federico Restrepo Toro</td><td>Ingeniería Civil</td></tr></table>	Nombre del estudiante	Programa Académico	Federico Restrepo Toro	Ingeniería Civil	
Nombre del estudiante	Programa Académico				
Federico Restrepo Toro	Ingeniería Civil				
Nombre del Jurado:	Carlos Andrie Blondon				
Evaluación del proyecto:					
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado					
Espacio exclusivo para jurado					
<input type="checkbox"/> Mención Pública <input type="checkbox"/> Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado					
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")					


Director del Programa


Director del Trabajo de Grado


Jurado